

**MARCELO COSTA NAPOLEÃO**

**FUSÃO DE IMAGENS LANDSAT-5 TM E SPOT PANCROMÁTICA  
APLICADA AO MAPEAMENTO DO USO DA TERRA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientadores: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Christel Lingnau  
Prof. MSc Alzir Felliipe Buffara  
Antunes


CURITIBA  
2001

**“FUSÃO DE IMAGENS LANDSAT-5 TM E SPOT  
PANCROMÁTICA APLICADA AO MAPEAMENTO  
DO USO DA TERRA”**

**POR**

**MARCELO COSTA NAPOLEÃO**

Dissertação nº 153 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Christel Lingnau (UFPR)  
Orientadora e Presidente

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Olga Regina Pereira Bellon - Membro (UFPR.)

  
Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno – Membro (UFPR)

Dedico a todos aqueles que tiveram um papel fundamental na minha educação, especialmente a:

Luiz Alencar Pedrosa Napoleão, meu pai, e à Josepha de Oliveira Costa, minha avó (ambos *in memoriam*)

**“Os que com lágrimas semeiam com júbilo ceifarão”**  
(Salmo 126:5)



## AGRADECIMENTOS

- Primeiramente a Deus, sem o qual nada se torna possível.
- Ao meu querido irmão Ramon e a minha prima Sophia, dos quais nunca deixei de receber atenção e apoio na tarefas difíceis de todo dia.
- Aos meus grandes amigos, pelo apoio nos momentos mais difíceis. Especialmente a Paty, Frá, Aline, Martini e Johnson, que sempre transmitiram palavras de afeto e de coragem na hora certa.
- Aos colegas de mestrado Lincoln e Alcides, que além de amigos, são grandes incentivadores e prestaram valiosa ajuda nas visitas à área de estudo.
- Aos amigos do mestrado, que sempre me deram força e transmitiram ânimo no esforço de concluir este trabalho. Em especial: Silvinha (Tazo), “Super-mamãe Elaine Jordan”, Elaine Cristine, Claudinha “Mineira”, Lucilene e Edilce.
- À Capes pela concessão da bolsa de estudo.
- Aos orientadores, por sua paciência e contribuições prestadas na orientação dessa dissertação.
- Ao Curso de Pós-Graduação e Ciências Geodésicas (CPGCG), Coordenadoria da Região Metropolitana de Curitiba (COMEC) e ENGESAT pelo apoio na concessão de material e documentação cartográficos, bem como equipamentos e programas nas suas dependências.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE TABELAS .....	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
3.1 OS SISTEMAS SPOT E LANDSAT .....	6
3.1.1 O Sistema SPOT.....	6
3.1.2 O Sistema Landsat.....	7
3.2 CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DOS ALVOS .....	9
3.2.1 Características Espectrais da Cobertura Vegetal .....	10
3.2.2 Características Espectrais dos Solos.....	14
3.2.3 Características Espectrais de Corpos D'água .....	15
3.2.4 Características Espectrais de Área Urbana.....	17
3.3 USO DE IMAGENS DE SATÉLITE NO MAPEAMENTO DO USO DA TERRA .....	18
3.4 MÉTODOS DE FUSÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE .....	20
3.4.1 Métodos de Substituição.....	24
3.4.1.1 Método de fusão por Transformação IHS.....	25
3.4.1.2 Transformação por Análise da Componente Principal.....	27
3.4.2 Método Pixel a Pixel: Cor Normalizada.....	29
3.4.3 Discussão Sobre os Métodos do Domínio Espacial.....	30
3.5 APLICABILIDADES DE IMAGENS HÍBRIDAS .....	31
<b>4. MATERIAL E MÉTODO .....</b>	<b>34</b>
4.1 ÁREA DE ESTUDO .....	34
4.1.1 O Relevo .....	35
4.1.2 O Clima.....	36
4.1.3 A Hidrografia .....	36
4.1.4 A Vegetação .....	37
4.2 MATERIAL .....	37
4.3 MÉTODO.....	38
4.3.1 Análise Visual das Imagens .....	38
4.3.2 Correção Geométrica.....	40
4.3.2.1 Retificação da imagem SPOT pancromática .....	40
4.3.2.2 Registro das imagens Landsat-5 TM e SPOT .....	41
4.3.3 Fusão das Imagens.....	41
4.3.3.1 Fusão por transformação IHS.....	41

4.3.3.2 Fusão por Componente Principal .....	43
4.3.3.3 Fusão pela Cor Normalizada.....	44
4.3.4 Análise das Imagens Híbridas.....	44
4.3.5 Correlação entre as Imagens .....	44
4.3.6 Classificação Digital.....	45
4.3.6.1 Definição das classes .....	46
4.3.6.2 Avaliação estatística das amostras de treinamento .....	50
4.3.6.3 Verificação da classificação digital .....	51
4.3.7. Pós-Classificação.....	52
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>53</b>
5.1 CORREÇÃO GEOMÉTRICA .....	53
5.1.1 Retificação da Imagem SPOT Pancromática.....	53
5.1.2 Registro das imagens Landsat-5 TM e SPOT.....	53
5.2 FUSÃO DAS IMAGENS.....	54
5.2.1 Fusão por Cor Normalizada .....	57
5.2.1.1 Interpretação das imagens.....	58
5.2.1.2 Análise da correlação.....	59
5.2.2 Fusão pela Transformação IHS.....	61
5.2.2.1 Interpretação das imagens.....	61
5.2.2.2 Análise da correlação.....	63
5.2.3 Fusão por Componente Principal .....	64
5.2.3.1 Interpretação das imagens.....	65
5.2.3.2 Análise da correlação.....	67
5.3 CLASSIFICAÇÃO DAS IMAGENS .....	69
5.3.1 Análise da Separabilidade entre as Classes .....	69
5.3.2 Análise da Classificação Digital .....	73
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>77</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>80</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>88</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.....	4
FIGURA 3.2 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO E OS SENSORES LANDSAT TM E SPOT ...	5
FIGURA 3.3 - EXEMPLOS DE ASSINATURAS ESPECTRAIS .....	9
FIGURA 3.4 - ABSORÇÃO DA CLOROFILA PELA VEGETAÇÃO VERDE .....	11
FIGURA 3.5 - VARIAÇÃO DA CURVA ESPECTRAL EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE .....	12
FIGURA 3.5 - CURVAS ESPECTRAIS PARA CORPOS D'ÁGUA DISTINTOS .....	16
FIGURA 3.6 - CURVAS ESPECTRAIS DE ÁREAS URBANAS .....	17
FIGURA 3.7 - CORRELAÇÃO ENTRE OS EIXOS DAS COMPONENTES PRINCIPAIS .....	22
FIGURA 3.8 - ASPECTO GEOMÉTRICO DA TÉCNICA DE SUBSTITUIÇÃO DE COMPONENTE .....	24
FIGURA 3.9 - SISTEMAS DE COORDENADAS IHS .....	26
FIGURA 4.1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	34
FIGURA 4.2 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA.....	38
FIGURA 4.3 - FLORESTA OMBRÓFILA MISTA ALTERADA .....	47

FIGURA 4.4 - FLORESTA OMBRÓFILA MISTA, PRÓXIMO À BR-277 .....	48
FIGURA 4.5 - FLORESTA CILIAR .....	48
FIGURA 4.6 - PASTAGENS EM ÁREA DE VÁRZEA ALTERADA .....	49
FIGURA 4.7 - REFLORESTAMENTO DE EUCALIPTOS .....	49
FIGURA 5.1 - IMAGEM ORIGINAIS SPOT PANCROMÁTICA E COMPOSIÇÃO 5 4 3 TM.....	55
FIGURA 5.2 - IMAGEM HÍBRIDA CNG1.....	58
FIGURA 5.3 - IMAGEM HÍBRIDA CNG2.....	59
FIGURA 5.4 - IMAGEM HÍBRIDA IHSG1.....	61
FIGURA 5.5 - IMAGEM HÍBRIDA IHSG2.....	62
FIGURA 5.6 - IMAGEM HÍBRIDAS CPG1.....	65
FIGURA 5.7 - IMAGEM HÍBRIDAS CPG2.....	66
FIGURA 5.8 - IMAGEM HÍBRIDAS CPG3.....	66
FIGURA 5.9 - IMAGEM CLASSIFICADA A PARTIR DA IMAGEM HÍBRIDA OBTIDA PELA FUSÃO POR COMPONENTE PRINCIPAL.....	76

### LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - BANDAS ESPECTRAIS DO SPOT .....	7
TABELA 3.2 - BANDAS ESPECTRAIS DO SENSOR TM.....	8
TABELA 4.1 - COORDENADAS DA ÁREA DE ESTUDO.....	35
TABELA 4.2 - MATERIAL CARTOGRÁFICO E DE APOIO .....	37
TABELA 4.3 - INFORMAÇÕES SOBRE AS IMAGENS.....	39
TABELA 5.1 - ERROS DA CORREÇÃO GEOMÉTRICA.....	54
TABELA 5.2 - IMAGENS ORIGINAIS E HÍBRIDAS RESULTANTES.....	55
TABELA 5.3 - CORRELAÇÃO ENTRE AS BANDAS ORIGINAIS TM.....	56
TABELA 5.4 - CORRELAÇÃO ENTRE AS IMAGENS ORIGINAIS E A BANDA SPOT PANCROMÁTICA.....	56
TABELA 5.5 - CORRELAÇÃO ENTRE AS BANDAS ORIGINAIS DO GRUPO G2 .....	57
TABELA 5.6 - CORRELAÇÃO ENTRE A BANDA PANCROMÁTICA E AS BANDAS HÍBRIDAS DOS GRUPOS CNG1 E CNG2.....	60
TABELA 5.7 - CORRELAÇÃO ENTRE AS BANDAS DE CNG1 E CNG2.....	60
TABELA 5.8 - DIFERENÇAS ENTRE AS CORRELAÇÕES DAS BANDAS DE CNG1 E CNG2 E OS DAS BANDAS ORIGINAIS.....	60
TABELA 5.9 - CORRELAÇÃO DA BANDA PANCROMÁTICA E AS COMPONENTES DA IMAGEM IHSG1.....	63
TABELA 5.10 - CORRELAÇÃO ENTRE A BANDA PANCROMÁTICA E AS COMPONENTES DA IMAGEM IHSG2.....	63
TABELA 5.11 - CORRELAÇÃO ENTRE AS BANDAS HÍBRIDAS IHSG1E IHSG2 .....	64
TABELA 5.12 - DIFERENÇAS ENTRE AS CORRELAÇÕES DAS BANDAS DE IHSG1 E IHS2 E AS DAS BANDAS ORIGINAIS.....	64
TABELA 5.13 - CORRELAÇÃO DA PRIMEIRA COMPONENTE DA IMAGEM HÍBRIDA CPG1 COM A SPOT PANCROMÁTICA .....	67
TABELA 5.14 - CORRELAÇÃO DA PRIMEIRA COMPONENTE DA IMAGEM HÍBRIDA CPG2 COM A SPOT PANCROMÁTICA .....	67
TABELA 5.15 - CORRELAÇÃO DA PRIMEIRA COMPONENTE DA IMAGEM HÍBRIDA CPG3 COM A SPOT PANCROMÁTICA .....	67
TABELA 5.16 - MATRIZES DE CORRELAÇÃO ENTRE AS BANDAS DAS IMAGENS HÍBRIDAS CPG1 E CPG2 .....	67
TABELA 5.17 - CORRELAÇÃO ENTRE AS BANDAS HÍBRIDAS DE CPG3.....	68
TABELA 5.18 - DIFERENÇAS ENTRE AS CORRELAÇÕES DAS BANDAS DE CPG1 E CPG2 E AS DAS BANDAS ORIGINAIS.....	68
TABELA 5.19 - DIFERENÇAS ENTRE AS CORRELAÇÕES DAS BANDAS DE CPG3 E DAS BANDAS ORIGINAIS .....	69
TABELA 5.20 - SEPARABILIDADE DAS CLASSES NAS IMAGENS CLASSIFICADAS .....	71
TABELA 5.21 - ACURÁCIA DAS IMAGENS CLASSIFICADAS.....	74

## RESUMO

O presente trabalho trata da investigação e comparação entre processos de fusão de imagens Landsat-5 TM e SPOT pancromática, observando os ganhos na interpretabilidade e na classificação das imagens híbridas resultantes, bem como na imagem original do Landsat. Sabe-se que o principal intuito da fusão de imagens é aproveitar tanto a maior resolução espacial, no caso do SPOT, quanto a melhor resolução espectral do Landsat-5 TM, gerando um produto que reúne ambas características. Compreendida entre os pontos de coordenadas Lat.  $-25^{\circ} 26' 32.33''$ ; Lon.  $-49^{\circ} 08' 57.11''$  e Lat.  $-25^{\circ} 36' 10.04''$ ; Lon.  $-49^{\circ} 00' 10.38''$ , a área de estudo localiza-se na região metropolitana de Curitiba, Estado do Paraná. O processamento digital das imagens teve início pela correção geométrica da imagem SPOT pancromática, baseada em pontos de controle obtidos de ortofotocartas em escala 1:10000, em seguida a imagem Landsat-5 TM foi registrada com relação à pancromática georreferenciada. Na correção geométrica da imagem SPOT, aplicou-se o método de reamostragem pelo Vizinho mais Próximo, e no registro da imagem Landsat-5 TM aplicou-se o método de reamostragem pela Convolução Cúbica. Então pôde-se dar seguimento aos três processos usados para fusão das imagens, a saber: Cor Normalizada, transformação IHS e Análise da Componente Principal (ACP). Observou-se um ganho significativo na interpretabilidade das imagens híbridas resultantes dos processos de fusão. Foi executada uma classificação do tipo supervisionada, com as regiões de interesse sendo definidas na imagem original Landsat-5 TM, em seguida foi utilizado o método da Máxima Probabilidade para a classificação das imagens. E com o propósito de avaliar o índice de acurácia da classificação, o coeficiente de concordância *Tau* foi calculado, permitindo comparar estatisticamente as imagens quanto à classificação. As imagens híbridas classificadas, geradas pelo método da Componente Principal e pelo método da Cor Normalizada, foram as que alcançaram os mais altos índices de acurácia na classificação.

## ABSTRACT

This work deals with procedures to merge Landsat-5 TM and SPOT panchromatic data. The main objective is to compare and to investigate gains by classification and visual interpretability of the resultant hybrid images and raw Landsat image. Three methods were used to merge the images: the IHS (Intensity-Hue-Saturation) transform, Principal Component Analysis (PCA) and Normalized Color. The merging of multisensor images intends to get not only the best spatial resolution from the panchromatic image but also the best spectral information from the Landsat image. The study area is in Curitiba metropolitan region, State of Parana, south of Brazil, being located between the coordinates points Lat.  $-25^{\circ} 26' 32.33''$ ; Lon.  $-49^{\circ} 08' 57.11''$  and Lat.  $-25^{\circ} 36' 10.04''$ ; Lon.  $-49^{\circ} 00' 10.38''$ . The images processing was achieved by a co-registration between SPOT panchromatic and Landsat images, so that it could be possible to merge the data. Taken out from an 1:10,000-escape orthophoto, a set of ground control points was used at first to make a geometric correction on a SPOT panchromatic image. In this step, the resampling of the pixels was performed by the Nearest Neighbor method whereas in the co-registration between SPOT and Landsat-5 images, the resampling method used was the Cubic Convolution. A better interpretability was observed in the resultant hybrid images. A supervised classification was performed, being the areas of interest defined in the raw Landsat image. The Maximum Likelihood was the algorithm used to classify the images. The *Tau* coefficient was calculated in order to assess the classification accuracy. As a result, the hybrid images obtained by both PCA and Normalized color achieved the higher values of *Tau* coefficient in their classified images.

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente utilização do sensoriamento remoto nas ciências que estudam o Meio Ambiente, demonstra e afirma a sua importância como ferramenta que pode auxiliar o Homem a solucionar problemas e a compreender fenômenos relativos ao Meio em que vive.

Tendo nas duas últimas décadas um considerável avanço no seu uso, as imagens de satélites revelaram-se uma importante fonte de dados aplicada ao gerenciamento de recursos naturais. Além disso, há uma contínua evolução de computadores e programas capazes de oferecer uma estrutura adequada para a execução das aplicações exigidas. Todavia, faz-se necessário o desenvolvimento de metodologias para o mapeamento da cobertura e uso do solo, contribuindo em facilitar a compreensão das atividades e fenômenos que ocorrem num espaço em questão.

Os dados do satélite americano Landsat e do francês SPOT (*Système Probatoire d'Observation de la Terre*), e mais recentemente do IKONOS, são os mais utilizados em grande parte do mundo, fazendo destes sistemas os mais importantes fornecedores de imagens empregadas em mapeamentos temáticos. Algumas das vantagens em utilizá-los são: o baixo custo quando comparado a outros métodos de levantamento; a qualidade e a quantidade dos dados gerados, além da facilidade de aquisição (BLANCHARD e WEINSTEIN, 1980; CHAVEZ, 1986; GRASSO, 1993).

A integração de imagens multisensoriais tem demonstrado resultados satisfatórios e surge como uma alternativa eficaz de combinar dados oriundos de diferentes satélites disponíveis no mercado. Iniciadas em meados da década de oitenta, as fusões de imagens ainda requerem estudos e experimentos. Pode ser realizada fusão com imagens geradas de um mesmo sensor ou com aquelas geradas por sensores distintos, como Landsat e SPOT (WELCH, 1985; WELCH e EHLERS, 1987); ou ainda fundir dados desses últimos sensores com imagens de RADAR ou fotografias aéreas digitalizadas (CHAVEZ, 1986). A vantagem é tomar proveito da imagem de maior resolução espacial, procurando-se preservar ao máximo as características espectrais das demais imagens empregadas.

O uso de fusão de bandas do sensor Landsat-5 TM com a banda pancromática do SPOT, ambas de resoluções diferentes, proporciona como produto resultante uma imagem híbrida, que contém a alta resolução espectral do Landsat e a resolução espacial de 10 m, vinda da banda pancromática do SPOT (WELCH e EHLERS, 1987). Dependendo do nível de detalhamento que se deseja obter, a imagem híbrida resultante pode fornecer uma resolução espacial satisfatória para mapeamentos em escalas menores ou iguais a 1:25000 (WELCH, 1985). Além desta, outras vantagens ressaltam a importância desta técnica: permite uma melhor definição dos limites que separam cada classe, melhorando visualização das feições e consequentemente, facilitando a interpretação na classificação das imagens. Entretanto, a classificação digital de imagens híbridas ainda demanda muitos estudos, pois para se obter confiança na geração de dados para a classificação, é necessário avaliar a separabilidade das classes presentes nas imagens híbridas, assim como investigar a eventual degradação dos dados, que pode ocorrer durante o processo.

Da mesma forma em que ocorre com outras metodologias, os produtos finais da fusão das imagens também podem ser utilizados na formação de um banco de dados georreferenciados a respeito da área em questão, contribuindo no fornecimento de dados para uma eventual implantação de um Sistema de Informações Geográficas (S.I.G.), o qual permite aos mais diversos tipos de usuários e técnicos, usar, consultar, avaliar ou pesquisar, enfim, manipular com facilidade todas as informações disponíveis, segundo seus propósitos, visto que a questão ambiental é de caráter multidisciplinar e em um mapeamento de uso da terra se faz necessário, enquanto fonte de informação cartográfica.

A área de estudo, estando localizada na região metropolitana de Curitiba, onde se desenvolvem diversos tipos de atividades humanas e sócio-econômicas, apresenta-se como um interessante campo para a aplicação das técnicas pretendidas aqui devido à diversidade no uso do solo, além de sua vocação natural de abrigar reservatórios de água (projetados ou naturais) na encosta oeste da Serra do Mar.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O principal objetivo deste trabalho é fundir imagens Landsat-5 TM e SPOT pancromática a fim investigar as contribuições de aplicação das imagens resultantes ao mapeamento do uso do solo.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

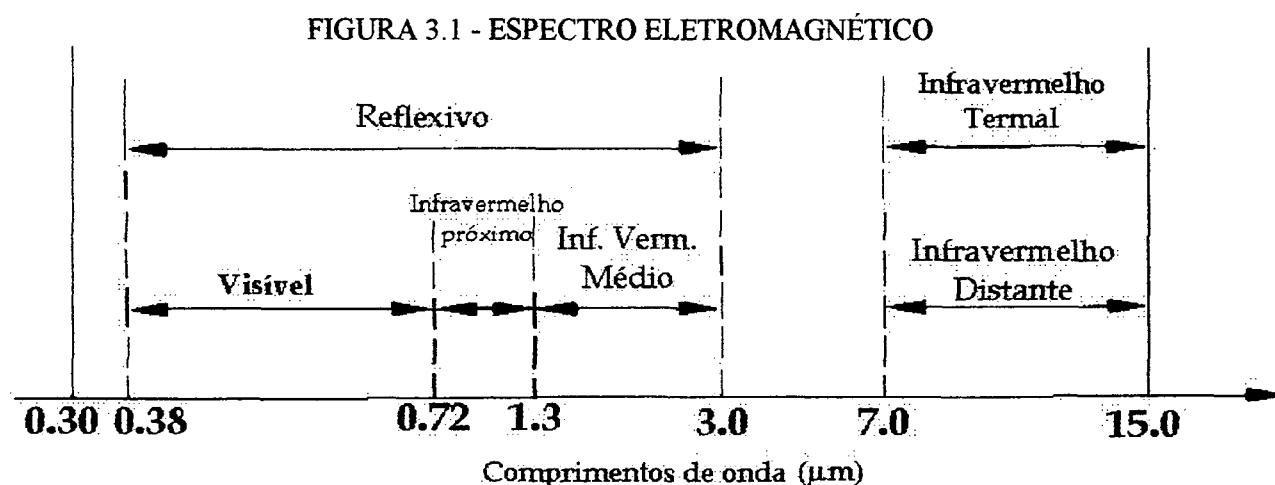
- 1 - Comparar os métodos de fusão de imagem, transformação IHS, transformação por principais componentes e transformação Cor Normalizada. Avaliando as imagens híbridas geradas por esses métodos.
- 2 - Aplicar técnicas de extração de informações das imagens, verificando a separabilidade e a discriminação das feições em cada imagem.
- 3 - Avaliar a acurácia dos dados oriundos da classificação digital das imagens híbridas, resultantes dos processos de fusão, e das imagens originais Landsat-5 TM, bem como as potencialidades das imagens híbridas para classificação digital.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O sensoriamento remoto pode ser definido como a captura e interpretação de dados em regiões do espectro eletromagnético por instrumentos à distância, isto é, sem o contato com o objeto, envolvendo ainda análise e manipulação dessas informações (LANDGRABE, 1978; CURRAN, 1987). Desta forma, pode-se pensar no sensoriamento remoto como uma maneira eficiente para encontrar soluções para problemas relacionados ao meio ambiente, que exigem informações seguras e em grande quantidade, impondo dificuldades em adquiri-las por outros meios (FISHER e LINDENBERG, 1989).

De acordo com LILLESAND e KIEFER (1994), os processos envolvidos no sensoriamento remoto dos recursos da terra, são basicamente os de aquisição e de análise de dados, observando-se as interações do espectro eletromagnético com os objetos que compõem a cena. SUITS (1983) define reflectância, como sendo a porção da energia incidente sobre um corpo que é refletida por ele, portanto cada corpo na superfície tem sua maneira peculiar de refletir a energia incidente, o que pode ser entendido como o comportamento espectral de cada alvo (SIMONETT, 1983).

Ao observar a FIGURA 3.1, pode-se ver a extensão da faixa de comprimentos de onda usados por sensores ópticos como os que estão a bordo do Landsat e do SPOT.

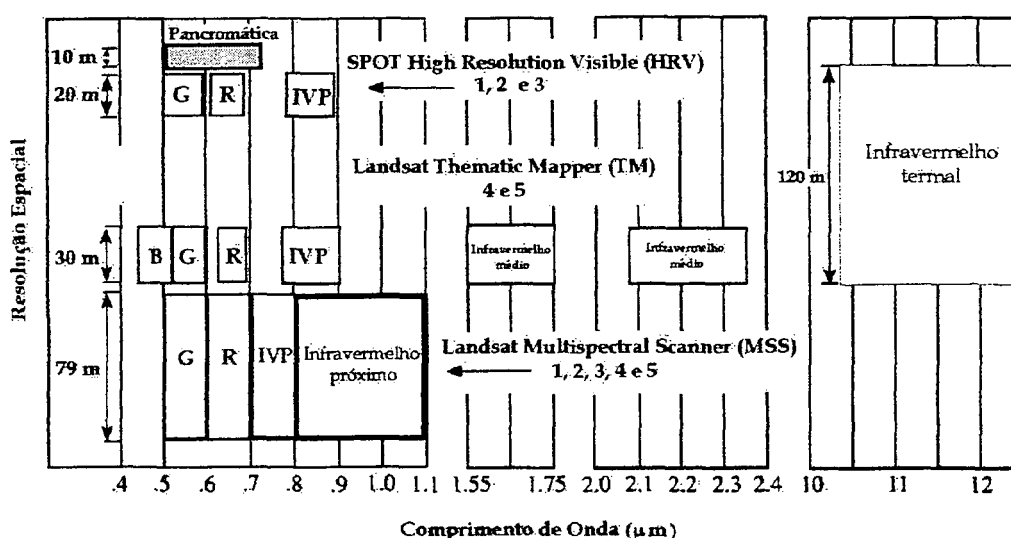


FONTE: Modificado de SILVA, 1978

Podem ser vistas as regiões do visível ( $0,38 - 0,72 \mu\text{m}$ ); infravermelho próximo ( $0,72 - 1,3 \mu\text{m}$ ); infravermelho médio ( $1,3 - 3,0 \mu\text{m}$ ) e infravermelho distante ( $7-15 \mu\text{m}$ ), também chamado de termal por captar as emissões de calor dos objetos (FIGURA 3.1).

As relações entre as resoluções espaciais e espectrais dos satélites SPOT, Landsat TM (4 e 5) e Landsat MSS estão presentes na FIGURA 3.2. No eixo das ordenadas (y) estão escritas as resoluções espaciais e nas abscissas (x) estão as faixas de abrangências das bandas de cada sensor, observando que a iniciais IVP significam infravermelho próximo.

FIGURA 3.2 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO E OS SENSORES LANDSAT TM E SPOT



FONTE: Modificado de JENSEN, 1996

Apesar do aprofundamento no conhecimento das características espectrais dos alvos, foi necessário o desenvolvimento de técnicas que aumentassem a capacidade de interpretação de imagens digitais. Dessas técnicas originaram-se os métodos de fusão de imagens.

O emprego cada vez maior de imagens de satélite em mapeamentos temáticos, contava agora com ferramentas capazes de unir o que sensores distintos ofereciam de melhor. Entretanto, novos métodos continuam a ser desenvolvidos e aperfeiçoados, suas aplicações demandam ainda experimentos e cuidados com a manipulação dos dados, frente à diversidade de ambientes encontrados no planeta.

### 3.1 OS SISTEMAS SPOT E LANDSAT

Os sistemas SPOT e Landsat-5 TM são, entre os demais sistemas, os mais empregados mundialmente, devido à facilidade de aplicação e aquisição de seus dados. São considerados, portanto, com os mais importantes sistemas ópticos de levantamento por imagens captadas do espaço.

As seguir serão vistas sucintamente as características gerais desses sistemas, além de alguns exemplo de utilização de suas imagens.

#### 3.1.1 O Sistema SPOT

Contando com a participação de países como Suécia e Bélgica, foi iniciado em 1978 pelo governo francês um programa de satélites espaciais denominado *Système Probatoire d'Observation de la Terre* – SPOT. O primeiro de uma série de cinco satélites foi lançado em 1986, hoje fora de operação; o segundo e o terceiro foram lançados, respectivamente, em janeiro de 1990 e setembro de 1993. O SPOT-4 teve seu lançamento em março de 1998 e o SPOT-5 virá a ser lançado posteriormente (LILLESAND e KIEFER; 1994; JENSEN, 1996).

Em órbita da Terra a uma altitude de 832 km e realizando um período de 26 dias (um período corresponde a uma volta completa em torno da Terra, ao passar novamente por sobre um mesmo ponto da superfície terrestre). O satélite está equipado com sensores do tipo Haute Resolution Visible – HRV, que operam em dois modos, pancromático e multiespectral, com resoluções espectrais e espaciais diferentes (TABELA 3.1) para cada modo, a saber: a banda pancromática com resolução espacial de 10 m, e as bandas XS, que operam na região do infravermelho e que possuem resolução espacial de 20 metros (CHAVEZ e BOWELL 1988). Além disso, o SPOT pode produzir imageamento monoscópico, ao operar na direção nadir, e imageamento estereoscópico, quando requisitado a trabalhar com uma inclinação que pode variar de zero (no nadir) ao valor máximo de até 27° (graus). A área de cobertura de cada cena também pode variar de acordo com essa inclinação, respectivamente, de 60 x 60 km a

80 x 80 quilômetros (LILESAND e KIEFER, 1994).

TABELA 3.1 - BANDAS ESPECTRAIS DO SPOT

Modos	Resolução espacial	Comprimento de Onda ( $\mu$ )	Aplicações
P (Pancromático)	10m	0.51 – 0.73	Uso da terra, e estudos urbanos
XS1 (Infravermelho)	20m	0.50 – 0.59	Agricultura, áreas urbanas, sítios geológicos, imagens estereoscópicas
XS2 (Infravermelho)	20m	0.61 – 0.68	
XS3 (Infravermelho)	20m	0.79 – 0.89	

FONTE: modificada de CHAVEZ e BOWELL, 1988

Os dados do SPOT estão disponíveis ao usuário com diferentes níveis de correção, de acordo com o nível de pré-processamento, as imagens brutas podem sofrer correções radiométricas e geométricas, níveis 1A e 1B; correção do relevo, níveis 2, 3, e 4; e o nível de correção S, que permite a superposição de imagens e portanto o imageamento estereoscópico (CHERVEL et al., 1981).

Segundo CHAVEZ e BOWELL (1988), comparando-se o conteúdo das informações contidas nas bandas XS do SPOT com o que pode ser extraído das bandas 1, 3, 4 e 5 do sistema Landsat, pode-se concluir que as bandas XS do satélite francês trazem menos informações espectrais do que as do satélite Landsat. As bandas 2 e 7 não foram utilizadas por não estarem disponíveis. Entretanto os resultados foram similares aos que atingir-se-iam, se acaso fossem usadas as seis bandas do sensor TM.

### 3.1.2 O Sistema Landsat

Lançados pela agência espacial americana, *National Aeronautical and Space Administration* - NASA, nas décadas de setenta e oitenta, os satélites do programa Landsat eram constituídos de cinco unidades (Landsat-1, -2, -3, -4 e -5) das quais apenas o Landsat-5 está em atividade, operando a uma altitude de 705 km, este satélite

passa por um mesmo ponto da superfície da Terra a cada 16 dias, cobrindo uma área de 185 x 185 km em uma cena completa (SLATER, 1974; SALOMONSON et al., 1981).

O Landsat-5 possui sensores do tipo TM (*Thematic Mapper*), que oferecem uma gama de seis bandas espectrais e uma resolução espacial de 30 m (TABELA 3.2), (BLANCHARD e WEINSTEIN, 1980) e uma banda termal. Observa-se também a dimensão do IFOV (*Instantaneous Field-Of-View*), campo instantâneo de visão, que para a banda 6, termal, oferece uma menor resolução, de 120 metros. As principais aplicações foram resumidas na última coluna (à direita) apenas para citar alguns exemplos de aplicação (TABELA 3.2).

TABELA 3.2 - BANDAS ESPECTRAIS DO SENSOR TM

Banda	Comprimento de onda (μm)	Localização no espectro	IFOV (m)	Principais aplicações
1	0,45 - 0,52	Azul	30 x 30	Discriminação de solo e vegetação e profundidade de corpos d'água.
2	0,52 - 0,60	Verde	30 x 30	Avaliar e discriminar vegetação
3	0,63 - 0,69	Vermelho	30 x 30	Absorção de clorofila
4	0,76 - 0,90	Infravermelho próximo	30 x 30	Tipos de vegetação, teor de biomassa, e delineamento de corpos d'água
5	1,55 - 1,75	Infravermelho médio	30 x 30	Indicação de umidade do solo e da vegetação.
6	10,4 - 12, 5	Infravermelho Termal	120 x 120	Aplicações Termiais, realce da vegetação
7	2,08 - 2,35	Infravermelho médio	30 x 30	Discriminação de minerais e tipos de rochas.

FONTE: Modificada de BLANCHARD e WEINSTEIN, 1980

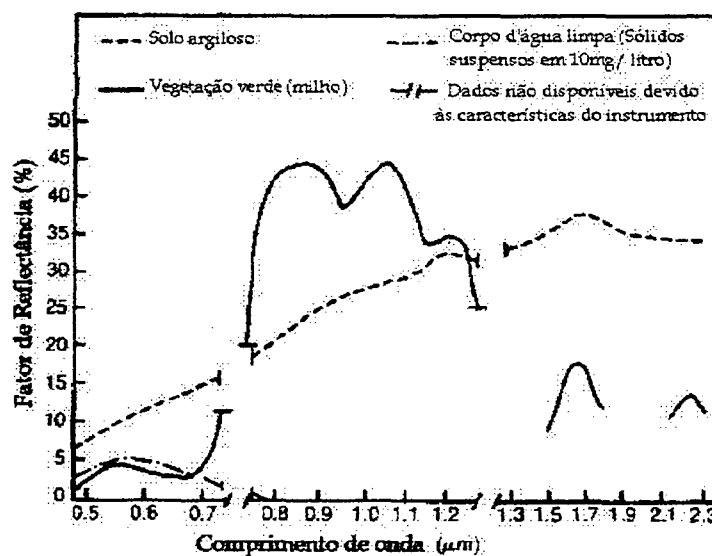
Dando continuidade ao programa, foi lançado pela NASA o satélite Landsat-7 (a missão 6 foi perdida no lançamento), que possui como principais características: resolução espacial de 15m, cobertura de cena de 60 x 60km e imageamento estereoscópico.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DOS ALVOS

O comportamento espectral das feições da superfície terrestre pode ser representado graficamente pela assinatura espectral do alvo, que se trata de uma curva onde se tem a intensidade de energia emitida pelo alvo em uma determinada região do espectro eletromagnético (LANDGREBE, 1978), sendo o conhecimento dessas relações de vital importância para o tratamento digital e análise de imagens de satélite. Segundo HOFFER (1978), a resposta espectral de cada alvo varia de acordo com as interações entre energia e matéria.

De acordo com HUNTER e BIRD (1970), que utilizaram fotografias obtidas nas regiões do visível e do infravermelho, também usadas na geração de imagens de satélite, as características espectrais dos alvos mais comuns podem ser agrupadas em categorias básicas como, água, solo, vegetação, gelo e áreas urbanas.

FIGURA 3.3 - EXEMPLOS DE ASSINATURAS ESPECTRAIS



FONTE: Modificada de BARTOLUCCI et al., 1977

Na FIGURA 3.3 podem-se perceber as assinaturas espectrais de diferentes respectivos alvos em cada região do espectro. Na região de 0.5 a 0.7  $\mu\text{m}$ , ocorre a maior reflexão do corpo d'água limpa (com uma taxa de 10mg/l de sólidos suspensos); nas demais regiões a energia é completamente absorvida pela água. Os solos (Silte-argila), em geral, têm sua mais alta reflectância na região do infravermelho médio,

com pico ocorrendo entre 1,5 e 1,9  $\mu\text{m}$ ; A assinatura da vegetação verde, no caso o milho, estende-se do espectro visível ao infravermelho médio, tendo maior intensidade no infravermelho próximo (0,8 a 1,2 $\mu\text{m}$ ).

COLWELL et al. (1963) realizaram um dos primeiros estudos sobre as interações da energia com a matéria. Foram observados os efeitos do espalhamento atmosférico nos filmes pancromáticos (0,4 – 0,75  $\mu\text{m}$ ) e foram estabelecidas as primeiras assinaturas espectrais de algumas espécies arbóreas na porção de 0,4 a 0,9 $\mu\text{m}$  do espectro. Os trabalhos de EGBERT e ULABY (1972) tinham como principal objetivo investigar como o conhecimento das curvas espectrais de reflectância (obtidas em campo) pode ajudar na interpretação de imagens (multibandas). Foram utilizadas fotografias nas regiões do vermelho e do infravermelho e os resultados demonstraram as relações da reflectância com a altitude e sombra.

Deve-se considerar que a resposta espectral dos alvos ocorre de maneira peculiar para cada trecho do espectro e muitas vezes, para uma mesma categoria de alvo pode-se ter diferentes assinaturas espectrais, dependendo da variação na natureza do alvo em questão. Além disso, existem fatores que influem na captação da reflectância de um determinado alvo pelo sensor, dentre esses fatores, o ângulo de incidência solar, interferências atmosféricas, presença de névoa ou nuvens e sombras são vistos como os mais importantes (HUNTER e BIRD, 1970; HOFFER, 1978; LANDGREBE, 1978).

A seguir, serão vistos com maiores detalhes os comportamentos espectrais para as principais categorias de alvos .

### 3.2.1 Características Espectrais da Cobertura Vegetal

Segundo COLWELL (1974), os mais importantes parâmetros necessários para determinar e compreender a reflectância da cobertura vegetal são: transmitância da folha, área e orientação da folha, características de outros componentes da vegetação (galhos, ramos e troncos), reflectância do solo, ângulo de incidência da luz solar e

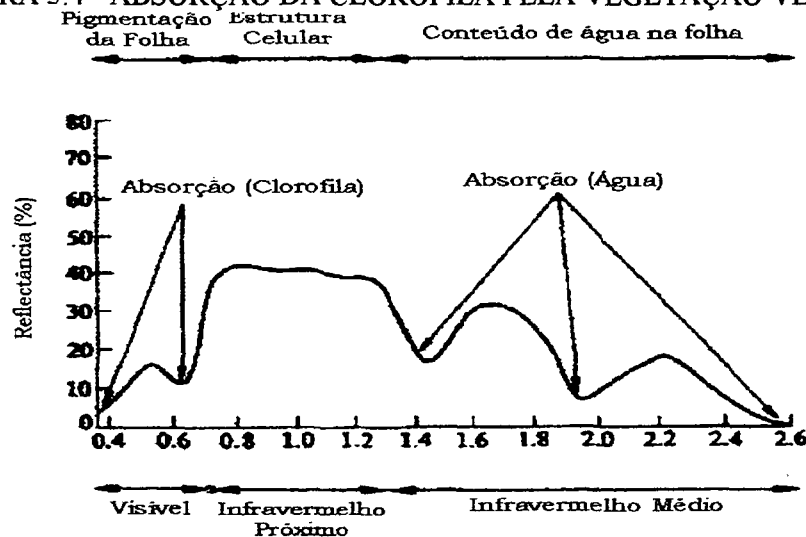


ângulo de visada. A reflectância do solo afeta a reflectância da cobertura vegetal, especialmente quando esta última é rarefeita. Outro fator que pode agir combinado com este é a sombra.

De acordo com HOFFER (1978), a reflectância espectral da vegetação verde, em geral, pode ser distinta e variável com o comprimento de onda. Uma típica curva de reflectância da vegetação verde pode se estender da região do visível, onde a resposta espectral é dominada pelo pigmento da planta, até a região do infravermelho médio, na qual a energia é imensamente absorvida pela água. Além disso, folhas verdes possuem um alto conteúdo de umidade, consequentemente há pontos de grande decréscimo na assinatura espectral nos comprimentos de onda 1,4; 2,0 e 2,6 micra.

Por outro lado, é na região do infravermelho próximo que ocorre a mais alta reflectância da vegetação, devido falta de absorção dessa energia pela folhas verdes, nessa região, a estrutura da interna da folha determina a reflectância (GAUSMAN, 1974). Tais comportamentos podem ser facilmente compreendidos, observando-se a FIGURA 3.4.

FIGURA 3.4 - ABSORÇÃO DA CLOROFILA PELA VEGETAÇÃO VERDE

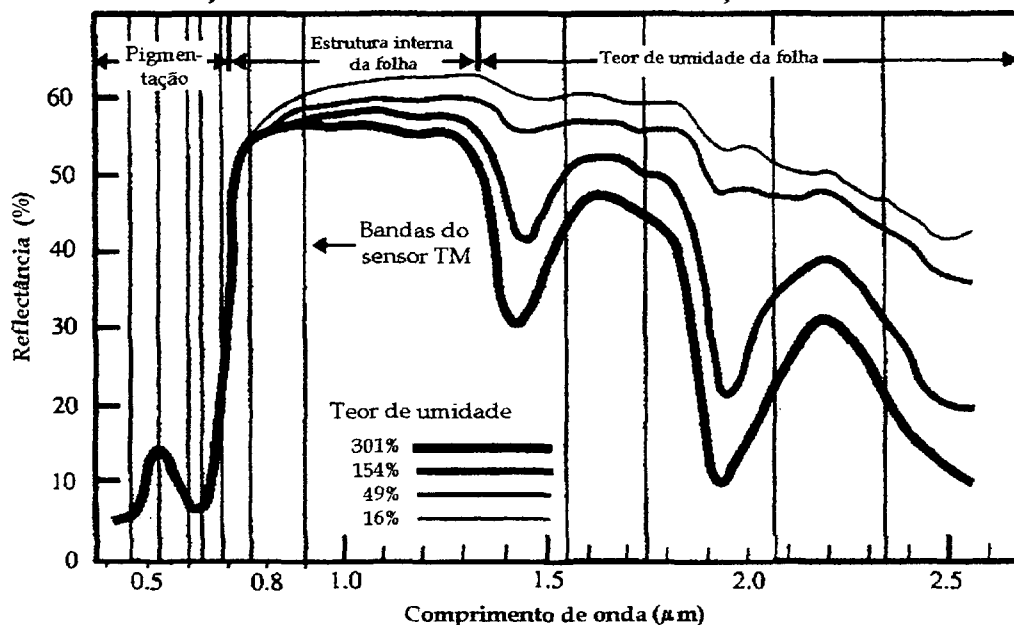


FONTE: Modificada de HOFFER, 1978

É interessante destacar o fato de que uma mesma espécie de vegetação pode apresentar variações nas curvas espectrais, conforme a variação do teor de umidade em suas folhas. Na FIGURA 3.5 pode-se notar as diferenças das curvas para as folhas do plátano (*Platanus occidentalis*) em função do teor de umidade. O maior afastamento

entre as curvas começa no infravermelho próximo e tem maior amplitude no infravermelho médio (TUCKER, 1977; TUCKER 1978). Segundo HUNTER e BIRD (1970), as variações nas curvas espectrais podem ocorrer também de acordo com as estações do ano.

FIGURA 3.5 – VARIAÇÃO DA CURVA ESPECTRAL EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE



FONTE: Modificada de JENSEN et al., 1983

Segundo COLWELL (1974), a quantidade de sombra em um dossel de uma vegetação é muito importante na reflectância do mesmo. VINOGRADOV (1969) descobriu uma correlação entre reflectância e o percentual de cobertura da vegetação de gramíneas na região espectral do visível, a qual ele atribuiu a um aumento da sombra no dossel enquanto havia aumento no percentual da cobertura vegetal. Enfim o autor mostrou as divergências de opiniões, entre estudos de diferentes autores, a respeito da sombra na reflectância. COLWELL (1974) afirma que o mais importante fato relativo à sombra, é que há diferenças de “escuridão” da sombra, ou seja, níveis de cinza com valores baixos, em diferentes bandas espectrais. O efeito da variação na quantidade de sombra é maior na região espectral do vermelho e do infravermelho, por isso uma fração do tipo banda vermelha sobre banda do infravermelho, que é útil na normalização de algumas variáveis do meio ambiente, não seria inteiramente eficiente na normalização das variações na quantidade de sombra. Esta teria seus efeitos apenas

atenuados.

Em estudos realizados por HORLER et al. (1983), discutem-se as relações entre a reflectância e a saúde (ou vitalidade) da vegetação. Foi utilizada como parâmetro a borda vermelha (“*red edge*”), que é uma característica única da vegetação verde, pois é resultado de duas propriedades ópticas do tecido da planta, a saber: o espalhamento causado pela estrutura interna da folha no infravermelho e a absorção de clorofila. A ocorrência da “*red edge*” se dá entre 0,68 e 0,75  $\mu\text{m}$  e permite distinguir a vegetação viva de outros alvos. Entretanto, ela pode ser estabelecida pela combinação de bandas do vermelho e infravermelho (RICHARDSON e WIEGAND, 1977; TUCKER e SELLERS 1986; BOOCHS et al., 1990).

De maneira geral, características espectrais da vegetação podem ser detectadas pelas imagens de satélites, embora se tenha chegado a resultados, muitas vezes, conflitantes, tais características podem estar relacionadas com a saúde da planta. A escolha da composição multiespectral adequada para o mapeamento poder variar, como é detalhado a seguir.

Segundo, HOLBEN et al.(1983), ao utilizar as bandas 3, 4, e 5 do sensor TM do Landsat, foi possível estabelecer relações entre a detecção do estresse de água nas plantações de soja e aquelas bandas. Dentre as quais, a banda 4 foi a mais receptiva na identificação do estresse. Contrariando os resultados de TUCKER (1980), em que a banda 5 era a mais sensível ao estresse de água na folha, e por outro lado, concordando com o resultados de RIPPLE (1986), que também usou a banda 7, e com os de CIBULA et al. (1992), que utilizou todas as bandas do sensor.

Segundo TOWNSHEND (1984), na discriminação de tipos de agricultura, uma ótima escolha de bandas deveria incluir uma banda do visível, uma do infravermelho próximo e uma do infravermelho médio. Estas suposições para agricultura foram confirmadas com os trabalhos desenvolvidos por BENSON e De GLORIA (1985), que realizaram uma comparação entre o uso dos sensores Landsat-TM -*Thematic Mapper* – e do MSS – *Multispectral Scanner* aplicado ao levantamento de florestas, a composição de cores a partir das bandas 3, 4 e 5 do sensor TM, revelaram-se como sendo as melhores, isto é, mais indicadas para discriminar tipos florestais.

HORLER e AHERN (1986) dissertaram a respeito da composição com as bandas 1, 4 e 5 do sensor TM, que seria ligeiramente melhor para discriminação da vegetação do as bandas 3, 4 e 5, porém advertem para a presença de ruídos e baixa amplitude na banda 1, além do empobrecimento no aspecto visual da imagem em que a composição 1, 4 e 5 é inferior à composição 3, 4 e 5.

Segundo CHAVEZ (1992), há maior variabilidade espacial (de informação) nas bandas do infravermelho do que nas bandas do visível. Especialmente se a imagem possui área coberta por vegetação densa.

WALSH (1987) avaliou as relações existentes entre a declividade, o tipo de cobertura (vegetal), a área do topo (de morros) e as alterações na resposta espectral para o sensor MSS. Os resultados mostraram que os efeitos da topografia somando-se à variação das espécies de árvores, no tamanho e densidade do dossel refletem espectralmente diferente. Uma solução apontada é a utilização de modelo digitais de terreno nas áreas de relevo muito acidentado. FRANK (1988) sugeriu que imagens do sensor TM Landsat combinadas com modelo digital do terreno e índices de vegetação, além de atenuarem os efeitos da sombra, numa região de topografia muito acidentada, podem melhorar os resultados da classificação.

### 3.2.2 Características Espectrais dos Solos

HUNTER e BIRD (1970) afirmaram que as características do solo, por exemplo, estão intrinsecamente agrupadas na região do visível, entretanto há uma grande separabilidade, com menor sobreposição, quando vistas na faixa do infravermelho. É fácil ter uma ilustração deste fato, observando-se a FIGURA 3.3.

Segundo HOFFER (1978), as curvas de reflectância espectral do solo são geralmente menos complexas do que as da vegetação, podendo-se também dizer que o nível de reflectância dos solos cresce com o aumento do comprimento de onda, isso ocorre particularmente nas porções do visível e infravermelho próximo, do espectro eletromagnético. Apesar de curvas para diferentes tipos de solo terem formas similares entre si, existe um grande número de propriedades interrelacionadas com o solo que as

caracteriza. O teor de umidade, a quantidade de matéria orgânica, textura, teor de ferro e presença de argila, silte e areia são algumas das características que influenciam no comportamento espectral do solo. Dependendo do teor de umidade, um solo pode ter sua reflectância bastante reduzida na região do infravermelho médio (em torno de 1,9  $\mu\text{m}$ ). Os solos secos refletem mais na porção do visível, entretanto a textura do solo, determinada pelo conteúdo de argila, silte e areia, corresponde à maneira com que as partículas se agrupam formando grande parte da massa do solo.

Nos trabalhos de CONDIT (1970) e MUSICK e PELLETIER (1986) reafirma-se que existem fortes relações entre a reflectância espectral, a umidade do solo e o teor de óxido de ferro e matéria orgânica presentes no solo. O infravermelho médio (banda 7, que vai de 2,08 a 2,35  $\mu\text{m}$ ) é a melhor banda a ser empregada na predição da umidade do solo. As bandas 3, vermelho (0,63 a 0,69  $\mu\text{m}$ ), e a banda 5, infravermelho médio (1,15 a 1,30  $\mu\text{m}$ ) mostram-se como as melhores na avaliação do conteúdo de óxido de ferro; e o infravermelho próximo (banda 4 – 0,76 a 0,90  $\mu\text{m}$ ) como sendo a mais indicada para a detecção de matéria orgânica.

MUSICK e PELLETIER (1986) sugerem o uso de razões entre as bandas 5 e 7 do sensor TM para a detecção do conteúdo de argila no solo. Possivelmente a utilização de índices pode melhorar a discriminação do solo com a vegetação de pequeno porte.

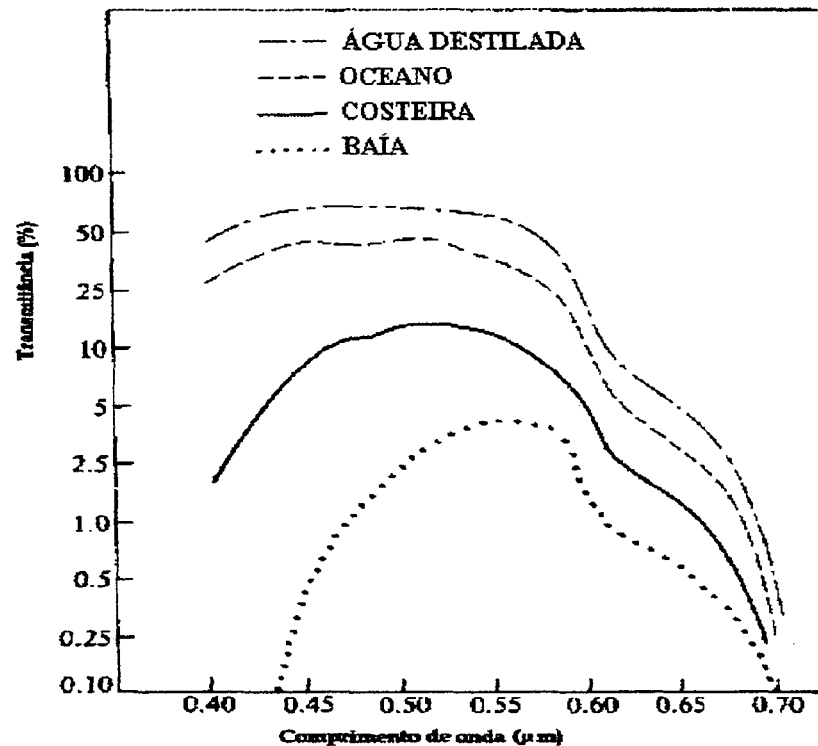
No Brasil, pesquisas relatam que, nos solos estudados em território nacional, a maioria mostrou-se espectralmente condicionada à porção do visível e infravermelho. Os resultados apontaram o valor 0,9 $\mu\text{m}$  do infravermelho próximo como o pico de absorção do ferro. (VALERIANO et al., 1995, VITORELLO e GALVÃO, 1998).

### 3.2.3 Características Espectrais de Corpos D'água

Normalmente imagens ou fotografias podem ser utilizadas para se obter informações sobre corpos d'água, seja do material do fundo, seja para estudo da turbidez, poluição ou ainda para averiguar as variações espaciais de certas

propriedades físicas próximas à superfícies. A transparência dos corpos pode variar muito com o ambiente terrestre ao redor. Segundo HUNTER e BIRD (1970), normalmente águas tropicais transmitem muito mais luz do que águas das regiões localizadas nas regiões temperadas. Chuvas pesadas e tempestades tendem a aumentar a turbidez dos corpos d'água mais rasos.

FIGURA 3.5 – CURVAS ESPECTRAIS PARA CORPOS D'ÁGUA DISTINTOS



FONTE: Modificada de SPECHT et al., 1973

Observando-se a FIGURA 3.5, pode-se ver como uma mesma categoria, água neste caso, representada por diferentes corpos d'água, pode apresentar diferentes curvas espectrais. É possível comparar as assinaturas espectrais da água destilada com as curvas dos tipos distintos como a água dos oceanos, de uma baía, ou aquela próxima a uma região costeira. Tais corpos absorvem e refletem diferentemente a porção de energia que incide sobre eles.

A reflectância da água pode variar de acordo com a região espectral utilizada KRITIKOS (1974). Na região do infravermelho, a água apresenta uma baixa reflectância, quase nula, se comparada com a vegetação e solo, o que significa uma

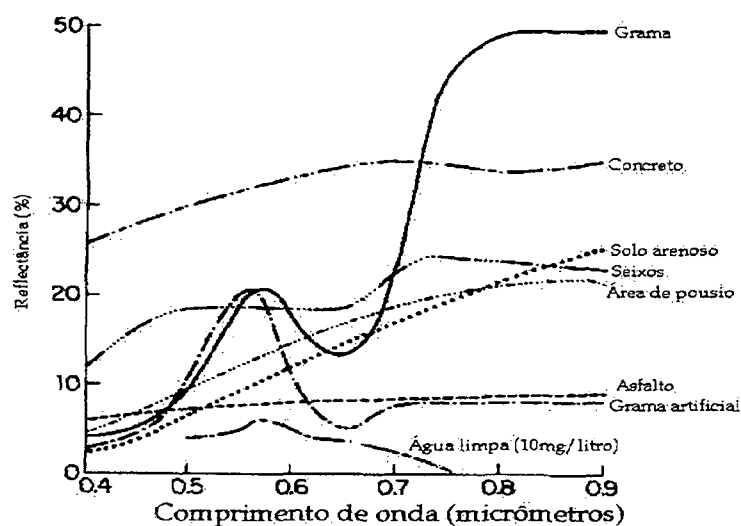
total absorção da energia. Por outro lado, na região do espectro que vai de 0.5 a 0.7  $\mu\text{m}$  (região do visível) se observa a mais alta resposta espectral da água (HOFFER, 1978). Esta região também corresponde às bandas 1, 2 e 3 do sensor TM.

### 3.2.4 Características Espectrais de Área Urbana

Normalmente, segundo JENSEN et al. (1983), uma imagem de satélite, que se refira a uma área urbana, pode apresentar uma grande complexibilidade espectral. Isto se deve ao fato de que, nesse tipo de cena, há uma quantidade suficientemente alta de diferentes tipos de feições a ponto de gerar uma mistura dos dados espectrais. A FIGURA 3.6 ilustra as curvas de alvos que freqüentemente ocorrem em regiões de paisagem urbana.

Sabe-se que em tais regiões é muito comum a presença de névoa ou mesmo de poluição atmosférica. Segundo os estudos de HUNTER e BIRD (1970), a região do infravermelho oferece uma maior penetração na névoa, se comparado com a região do visível. Esta afirmação também é válida para áreas sujeitas à poluição atmosféricas, que ocorrem geralmente em cidades de grande porte e áreas industriais. Além disso, deve-se considerar que a faixa do espectro correspondente ao infravermelho ressalta melhor as vias pavimentadas.

FIGURA 3.6 – CURVAS ESPECTRAIS DE ÁREAS URBANAS



FONTE: modificada de JENSEN et al., 1983

Na FIGURA 3.6 pode-se ver as contribuições das diversas feições para a curva espectral urbana. Imagens na região do infravermelho próximo, médio e termal podem trazer mais informações, que auxiliem na discriminação de alvo urbano. Entretanto o efeito da sombra, que afeta feições verticais (edifícios e torres muito altos etc.), é mais tênue na faixa do azul (pico em  $0,4 \mu\text{m}$ ). Imagens de sensor radar podem, combinadas com essas, melhorar a interpretação da textura e demais características da feições urbanas.

### 3.3 USO DE IMAGENS DE SATÉLITE NO MAPEAMENTO DO USO DA TERRA

Segundo DUGGIN e ROBINOVE (1990), é necessário ser sensato quanto ao papel representado pelo sensoriamento remoto no mapeamento temático, não se pode pensar, portanto, que se trata de uma “panacea” para todos os problemas e nem deve-se tomar uma posição de absoluta descrença. Entretanto é impossível negar a sua importância crescente como uma ferramenta útil na questão ambiental e no gerenciamento dos recursos naturais em geral.

A consciência da necessidade de preservação, que é alcançar benefícios do crescimento com a garantia da continuidade do uso dos recursos, nasceu paralelamente à questão ambiental (LO, 1986). Segundo BARRET e CURTIS (1992), pode-se resumir em três objetivos da conservação: (1) manutenção dos processos ecológicos essenciais e os sistemas de suporte à vida; (2) preservação da diversidade genética e (3) assegurar a utilização sustentável de espécies e ecossistemas.

No Brasil, o projeto Radar da Amazônia – RADAM-Brasil – na década de setenta, forneceu dados de uma área de 4,5 milhões de  $\text{km}^2$ . Foram utilizadas aeronaves onde eram transportados os sensores que coletavam imagens de radar, os quais podiam operar independentemente da luz solar e das condições do tempo (SIMONETT, 1983). Foi possível com os dados gerados, mapear a vegetação, a rede hidrográfica e as principais estruturas geológicas da região da bacia do rio Amazonas, considerada de difícil acesso.

Entre os satélites de uso civil, os dados do Landsat e do SPOT são os mais



utilizados em metodologias que se destinam a levantamentos de recursos naturais e a sua distribuição na superfície terrestre, principalmente quando se deseja mapas em escalas menores que 1:25000. A coleta, o tratamento e as técnicas de gerenciamento destas informações permitem aos diversos tipos de usuários quantificar, qualificar, avaliar e fazer uso dos recursos naturais de forma adequada, contribuindo para a sua continuidade (LO, 1986). O mapeamento temático a partir de dados do Landsat ou do SPOT, ou do uso em conjunto de imagens geradas por ambos os satélites, tem um importante papel na aplicação destas imagens, tornando possível a geração de produtos cartográficos, que se referem a temas distintos como a vegetação, solo, áreas urbanas e rural, hidrografia, sistemas viários, ou ainda combinações destes assuntos (RASCH, 1994). GOODENOUGH (1988) descreve as potencialidades e dificuldades da integração de imagens TM e SPOT com um Sistema de Informação Geográfica, sendo essencial para um efetivo gerenciamento de recursos.

Hoje em dia, embora exista uma consciência para problemas ambientais, estes surgem do uso abusivo da terra, do ar e da água, pois crescem rapidamente as necessidades da população sobre esses recursos (LO, 1986). A água, diferentemente da maioria dos recursos naturais, está presente na terra ou atmosfera e é necessidade básica de todos os seres vivos (BARRET e CURTIS, 1992). Entretanto não se pode “separá-la” da influência e da importância dos outros elementos que compõem o Meio, como a vegetação, o solo, as áreas urbana e rural etc.

Como um bom exemplo de aplicação de imagens de satélites, KUMMER (1992) implementou o monitoramento da cobertura vegetal nas Filipinas durante a década de setenta e oitenta, no total foram cinco levantamentos, sendo o último deles realizado com imagens SPOT e os demais se utilizaram de dados do Landsat. Em outro caso tem-se o mapeamento de um parque de grandes extensão como o *National Lassen Volcanic*, no estado da Georgia, Estados Unidos, no qual WHITE et al. (1995) afirmaram que podem ser utilizadas imagens Landsat e dados auxiliares como fotografias aéreas (1:24000) e mapas topográficos em escala 1:50.000, além disso, pode-se criar um modelo digital da área baseado nos dados topográficos, pois algumas espécies não podem ser classificadas apenas pelos aspectos espectrais. Considerando-

se a classificação de tipos florestais uma tarefa árdua, devido à complexibilidade e à variabilidade na composição das espécies, o que as torna difícil de definir e identificar, SCHRIEVER e CONGALTON (1995) avaliam a variação sazonal como um auxílio ao mapeamento de tipos de cobertura vegetal baseado em dados Landsat-TM.

Em estudos que envolvem planejamento urbano, as informações geradas por satélites podem ser combinadas com dados censitários e técnicas de Sistema de informações geográficas – SIG; desta forma tem-se uma associação dos espaços urbanos, como os bairros por exemplo, com a densidade demográfica, além de outros aspectos que contribuem para o monitoramento do crescimento da população urbana, como as taxas de natalidade e mortalidade, e que estão fortemente ligadas às questões básicas no gerenciamento de uma cidade (GONG et al., 1990; JENSEN et al., 1994). Em outra abordagem urbana, SIFAKIS (1992), lançou mão e mostrou a vantagens da utilização do canal XS1 do SPOT para a produção de um mapa da distribuição (horizontal) da poluição atmosférica sobre a cidade de Toulouse, na França.

É também possível atualizar e manter uma rede de estradas localizadas numa área de exploração madeireira, através do uso de imagens pancromáticas do SPOT. Segundo JAZOULI et al. (1994), estas informações podem ser associadas a um modelo digital de elevação, em seguida tratadas digitalmente e incorporadas por um SIG para se obter um melhor aproveitamento do espaço explorado. De acordo com JOHNSON (1994), em uma área de edificações urbana, pode-se lançar mão de uma alta resolução espacial, como a do SPOT, e segmentar a classificação, melhorando-se o mapeamento do uso do solo e da rede viária, ruas e avenidas, de uma cidade.

### 3.4 MÉTODOS DE FUSÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE

Ainda na primeira metade da década de 80, foram realizadas as primeiras experiências para fundir imagens de diferentes resoluções espaciais de um mesmo sensor. SCHOWENGERDT (1980), trabalhou com dados do Landsat MSS, através de filtros de convolução, usando a resolução espacial inteira e comprimida para combinação das imagens. Ficou demonstrado que é possível usar a alta resolução

espacial para aumentar a nitidez e realce de bordas das feições nas imagens de resolução espacial mais baixa, que tenham características espectrais aproximadas.

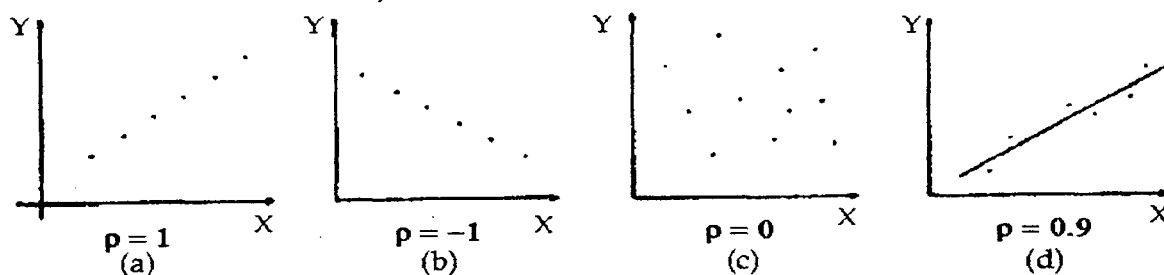
CLICHE et al. (1985) desenvolveram técnicas para integração de imagens do canal pancromático com imagens do modo multiespectral do sensor SPOT (Na verdade os dados foram simulados). Os métodos empregados, chamados de algoritmos de integração, eram operações aritméticas que envolviam funções como raiz quadrada, multiplicação e soma das imagens, além de pesos e constantes de valor pequeno, responsáveis pelo escalonamento da imagem resultante no intervalo de 0 a 225. Foi possível produzir imagens de alta resolução adequadas à fotointerpretação.

Os métodos de fusão podem ser aplicados para imagens de diferentes sensores, podem ser citados como exemplo dos sensores mais empregados, o Landsat MSS e TM com o SPOT; o SEASAT e *Shuttle imaging radar* (SIR-A e -B); *Advanced Very high Resolution Radiometer* (AVHRR) etc. CHAVEZ (1986) fundiu imagens do Landsat TM com fotografias pancromáticas digitalizadas do programa *National High Altitude Program* (NHAP), que possuíam resolução espacial de 4 metros. Foram estabelecidos dois passos básicos no processo de fusão: o registro geométrico e a combinação do dado para a análise visual ou digital.

CHAVEZ (1986) discutiu a relação da correlação (positiva, negativa e valor em módulo) entre as imagens, que se deseja fundir, e os métodos de fusão. Por exemplo, se houver correlação negativa entre os dados e o interesse maior (do usuário) estiver na informação colorida, seria melhor usar um método (de aritmética *pixel a pixel*), que se baseie em subtração e razão, e não envolva soma das imagens, para que haja preservação do colorido original. Outro método apresentado pelo autor, é a simples substituição de uma das imagens de baixa resolução pela imagem de resolução mais alta, ou seja, uma composição com imagens de resolução espacial distintas.

Podem ser vistas na FIGURA 3.7 as possíveis relações de sinal e valor absoluto da correlação entre dois conjuntos de dados, no caso imagens, da quais foram calculadas as componentes principais, onde a situação ideal de correlação está em (a) e a total falta de correlação é mostrada em (c), as demais são intermediárias.

FIGURA 3.7 – CORRELAÇÃO ENTRE OS EIXOS DAS COMPONENTES PRINCIPAIS



FONTE: modificada de TAYLOR, 1977

O uso de Análise da Componente Principal é outro método apresentado por CHAVEZ (1986), no qual a matriz de correlação pode ser usada para decidir quais bandas ou imagens serão utilizadas. Se o valor absoluto do coeficiente de correlação entre duas imagens é pequeno, elas não devem ser usadas na fusão devido à pouca ou nenhuma mistura que irá ocorrer entre os dados não correlacionados (isso ocorre por exemplo, entre dados Landsat e imagens de radar). Nesses casos a análise das componentes seletivas é mais indicada (CHAVEZ, 1989).

Técnicas, que originalmente eram empregadas no realce (e aumento de contraste) de imagens objetivando facilitar a interpretação das feições, foram aperfeiçoadas e adaptadas para uma nova finalidade: a fusão de imagens. A transformação IHS (Intensity-Hue-Saturation), a transformação por Componente Principal são algumas das técnicas nas quais se baseiam os métodos de fusão de imagens (WELCH e EHLERS, 1987; CHAVEZ e BOWELL, 1988; CHAVEZ et al., 1991).

Pode-se dividir em dois principais grupos os métodos com os quais se pode fazer fusão de imagens: os que operam no domínio espacial (CLICHE et al., 1985; WELCH e EHLERS, 1987; CHAVES, 1986; CHAVEZ et al., 1991; VRABEL, 1996; WALD et al., 1997; TOUTIN, 1998) e aqueles que são empregados no domínio da frequência (MORAN, 1990; PELLEMANS et al., 1993; YOCKY 1996). As técnicas desse último grupo fazem uso das séries de Fourier e da decomposição “*wavelet*” de multiresolução (YOCKY, 1996).

As vantagens e desvantagens em relação aos domínios espacial e da frequência, podem ser resumidas em alguns fatos importantes relatados por YOCKY (1996): imagens híbridas geradas por métodos do domínio da frequência podem apresentar

ruídos, o que requer elaboração de algoritmos específicos para minimizá-los, dificultando o processo. Além disso, pode haver problemas na discriminação de feições pouco definidas como áreas de pastagens e campos. Quanto à reconstrução das imagens, não se consegue efetuarla com perfeição em qualquer dos domínios. Sabe-se que os contornos das feições ficam melhor definidos em métodos do domínio espacial que são baseados na substituição de componente. Foi considerando estes fatos que abordaram-se apenas os métodos do domínio espacial neste trabalho.

MUNECHIKA et al. (1993) afirmaram que técnicas de fusão podem ser enquadradas em três categorias:

- a) combinação apenas para apresentação em tela (*“Merger for display”*), que nada mais é do que uma simples composição colorida na qual se usa uma imagem de resolução espacial mais alta;
- b) a fusão por manipulação separada da informação espacial, na qual se enquadram as fusões por transformação IHS e por Componente Principal, e
- c) a fusão para manter a integridade radiométrica dos dados originais, desenvolvida pelo próprio autor, esta se baseia na correlação local (da vizinhança) entre os pixels de baixa resolução espacial e a radiância média correspondente na imagem pancromática.

Uma outra classificação dos métodos de fusão, é apresentada por SHETTIGARA (1992), que considera os métodos de fusão de imagens baseados na transformação IHS e na Componente Principal como técnicas generalizadas de substituição de componente. Neste trabalho, considerou-se esta classificação juntamente com a modalidade sugerida por CLICHE et al. (1985), a qual trata da fusão pixel a pixel, assim chamada por utilizar um algoritmo que, a partir de uma função matemática matricial, percorre as imagens originais ponto por ponto, gerando as imagens híbridas. Tais métodos são detalhados mais adiante.

Diante do potencial que pode ser explorado utilizando-se dados de satélites como os do sistema Landsat e do SPOT, a fusão de imagens é, segundo WELCH (1985) e GOODENOUGH (1988), uma maneira de se aproveitar as melhores características desses sistemas: a comprovada alta resolução espectral do Landsat TM

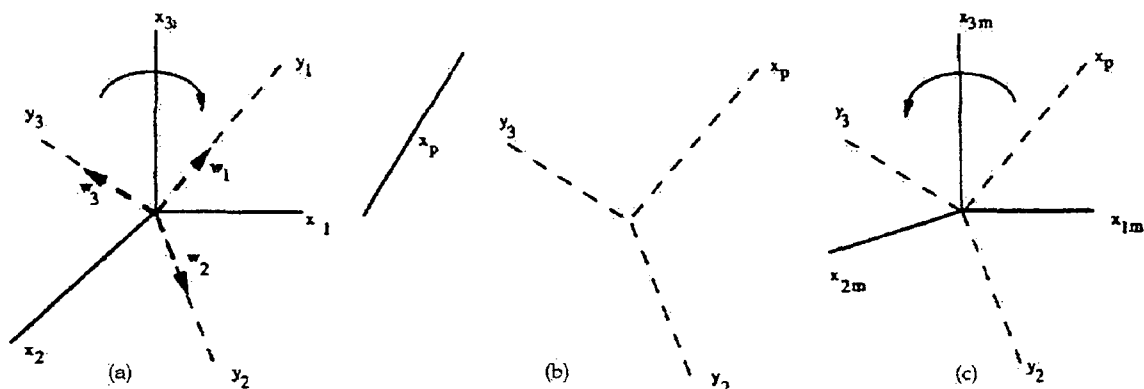
(CHAVEZ e BOWELL, 1988) e a alta resolução espacial (de 10m) da banda pancromática do SPOT, sendo possível gerar produtos cartográficos de qualidade, atendendo adequadamente à demanda por informações georreferenciadas.

Um bom exemplo dessa afirmação é relatado na pesquisa de MUNESHIKA et al. (1993), na qual verificou-se um aumento na acurácia da classificação quando são utilizadas imagens híbridas, advertindo-se que discrepâncias maiores foram encontradas quando foram usadas bandas pouco correlacionadas com a imagem de maior resolução espacial.

### 3.4.1 Métodos de Substituição

Retomando-se com mais detalhes o que foi citado anteriormente, pode-se afirmar que SHETTIGARA (1992) definiu o método de fusão por transformação IHS como uma técnica de substituição de componente. Foram estabelecidos critérios para um melhor aproveitamento das técnicas de substituição, as quais incluem também a fusão de imagens por Componente Principal (C.P.).

FIGURA 3.8 – ASPECTO GEOMÉTRICO DA TÉCNICA DE SUBSTITUIÇÃO DE COMPONENTE



FONTE: Modificada de SHETTIGARA, 1992

Portanto o procedimento, que envolve três passos básicos, é válido para a fusão IHS e por Componente Principal. Generalizando e simplificando o processo, tem-se que a primeira etapa é a transformação entre espaços, que pode se representada com

uma rotação de eixo que transporta os dados multiespectrais de um sistema para outro (FIGURA 3.8-a). O segundo passo, chamado reposição de componente, é a substituição, na qual o espaço transformado é repostado pela imagem de maior resolução (FIGURA 3.8-b). O terceiro e último passo, é a transformação inversa ao espaço original (FIGURA 3.8-c). Os detalhes da formulação matemática (as matrizes de transformação linear entre os sistemas de eixos) são apresentados e discutidos detalhadamente por SHETTIGARA (1992).

#### 3.4.1.1 Método de fusão por Transformação IHS

Desenvolvida por HAYDN et al. (1982) para produzir cores mais intensas e reduzir a correlação entre as imagens, a transformação IHS se utiliza de um espaço de cores mais semelhante à percepção dos olhos humanos do que o espaço de cores RGB (*Red*, *Green* e *Blue* respectivamente vermelho, verde e azul), este sistema de cores é empregado nos monitores de vídeo. Os principais atributos do espaço IHS são a intensidade (I), o matiz (representado por H de *hue*) e a saturação (S). SABINS (1987) definiu os atributos como sendo:

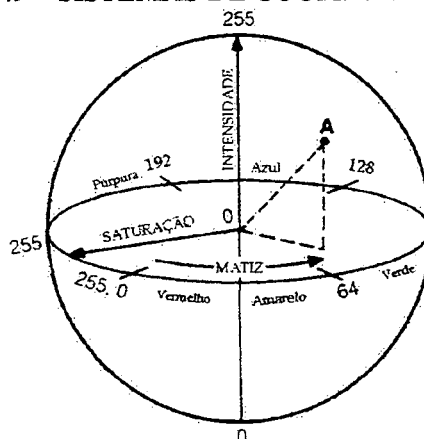
Intensidade: É a medida da energia total refletida em todos comprimentos de ondas, é responsável portanto pela sensação de brilho, que é captada pelos olhos.

Matiz: é determinada pelo comprimento de onda médio da energia emitida ou refletida pelo objeto, ele define a cor do objeto.

Saturação: é definida como o raio do comprimento de onda médio no qual a energia é refletida, expressando a pureza tonal do objeto.

O espaço de cores IHS é definido em um sistema de coordenadas cilíndricas, baseado numa esfera hipotética de cor onde os valores variam de 0 a 255. Na FIGURA 3.9 pode-se ver a relação entre as coordenadas de cor no sistema IHS e os seus respectivos eixos. Nota-se que o eixo vertical, representado pela intensidade, não está associado a nenhuma cor, mas sim à quantidade de brilho. Enquanto que a saturação está relacionada com a pureza da cor e o matiz com o seu comprimento de onda.

FIGURA 3.9 – SISTEMAS DE COORDENADAS IHS



FONTE: Modificada de SABINS et al., 1987

Segundo SABINS (1987), As relações entre os sistemas IHS e RGB são dadas pela seguintes expressões:

- a)  $I = (R + G + B) / 3$
  - b)  $H = (G - B) / (I * 3 * B)$ , e
  - c)  $S = (I * 3 * B) / I$
- (1)

O princípio da fusão por transformação IHS baseia-se no fato da componente I (expressão 1-a) ser muito parecida com a banda pancromática, compreendendo uma larga faixa do espectro.

Conforme as adaptações a transformação IHS foi sendo empregada com método de fusão de imagens (CHAVEZ et al., 1991; EHLERS 1991; PELLEMANS et al., 1993). Pode-se resumir o método em basicamente em quatro passos:

Transformação: Na transformação do espaço RGB para o IHS, são introduzidas três bandas do RGB (do sensor de resolução espacial mais baixa), que são transformadas em três bandas do espaço IHS.

Manipulação do contraste: São calculadas as estatísticas variância e média, e com base no histograma, é aplicado o contraste na imagem de resolução espacial mais alta, de forma a ter as mesmas características espectrais que a imagem de Intensidade I, porém com uma resolução espacial maior.

Substituição: A imagem de intensidade é substituída pela imagem contrastada, de resolução mais alta, que pode ser, por exemplo e neste caso, a banda pancromática do SPOT. Isso pode ser feito porque as imagens têm agora aproximadamente as mesmas



características espectrais.

Inversão: Com a “nova” componente I colocada em conjunto com as bandas S e H. Proceda-se então com a inversão do espaço IHS para o espaço RGB. Pela aplicação de uma transformação inversa, volta-se às coordenadas do espaço RGB, no qual todas as imagens híbridas possuem a resolução espacial da banda de maior resolução, no caso, a pancromática .

### 3.4.1.2 Transformação por Análise da Componente Principal

Em princípio, a Análise da componente principal foi empregada como uma técnica de reduzir o volume de dados e, ao mesmo tempo, melhorar o contraste das imagens. Neste trabalho, a fim de dinamizar a leitura, também será usado o termo Componente Principal, para se referir à fusão pela análise da Componente Principal. Pode-se concentrar a maior parte das informações de um conjunto de imagens, em apenas uma imagem sintética: a primeira componente, a qual também tem alto poder de contraste das feições. As demais componentes tem sua importância por reterem os ruídos e os efeitos da sombra, por exemplo (TOWNSHEND, 1984; SINGH e HARRISON, 1985).

Em trabalhos realizados por TOWNSHEND (1984), encontrou-se um alto nível na discriminação de tipos de agriculturas, aplicando a análise das principais componentes em um conjunto de imagens do Landsat TM. As análises indicaram que a maior discriminação foi alcançada quando empregou-se uma banda do visível, uma banda do infravermelho próximo e uma do infravermelho médio, devido a baixa correlação entre essas bandas.

HORLER e AHERN (1986) utilizaram as componentes principais para analisar o teor de informações, relativas a tipos florestais, contido em dados do Landsat TM, os resultados apontaram os melhores tripletes (conjunto de três bandas) para a discriminação geral de tipos florestais as composições 5, 4 e 3 e 1, 4 e 5, entretanto esta última é visualmente inferior a primeira composição.

Segundo CHAVEZ e KWARTENG (1989), as principais componentes além de

reduzirem o volume de dados, desprezando as informações redundantes, têm a vantagem de poder processar um conjunto maior do que três imagens. Foi sugerido um processo seletivo de análise da Componente Principal, que redimensionava o conjunto de dados, minimizando a perda de informações; realçava o contraste espectral entre diferentes regiões do espectro, além de proporcionar imagens resultantes de fácil interpretabilidade visual. Foi estabelecido que o grau de correlação entre duas imagens está relacionado (inversamente proporcional) com a quantidade de contraste espectral, ou seja, quanto mais alta a correlação menor o contraste e vice-versa.

A Componente Principal, empregada como método de fusão de imagens por CHAVEZ (1989), mostrou-se tão eficaz quanto os demais métodos usados por ele naquela pesquisa. Em princípio pode-se substituir qualquer uma das componentes principais desde que seja bem correlacionada com a imagem de alta resolução espacial. Ocorre, na prática, que geralmente a primeira componente obedece àquela condição.

Pode-se resumir os passos do processo de fusão pela Componente Principal, de acordo com as etapas que se seguem (SHETTIGARA, 1992; CHAVEZ, 1986):

- **Transformação**: são introduzidas três ou mais bandas do espaço RGB (do sensor de resolução espacial mais baixa), que são transformadas em três ou mais novas imagens do espaço das componentes principais, cada componente possui quantidades distintas de informações, na primeira componente (PC1) estão aproximadamente 90% das informações contidas nas imagens originais.
- **Manipulação do contraste**: analogamente ao que foi feito na transformação IHS, são calculadas as estatísticas variância e média, e com base no histograma, é aplicado um contraste na imagem de resolução espacial mais alta, de forma a torná-la com características espectrais próximas as da imagem correspondente à primeira componente PC1, entretanto com a vantagem de possuir uma resolução espacial maior.
- **Substituição**: a primeira componente é substituída pela imagem que foi contrastada, de resolução mais alta, que pode ser neste caso, a banda pancromática do SPOT. Isso pode ser feito porque assume-se que as imagens tem agora aproximadamente as mesmas características espectrais.

- Inversão: Com a “nova” componente I colocada em conjunto com as demais componentes (PC2, PC3 etc.) e procede-se com inversão do espaço da Componente Principal para o espaço RGB. Pela aplicação de uma transformação inversa e volta-se às coordenadas do espaço RGB, no qual todas as imagens híbridas possuem a resolução espacial da banda de maior resolução.

### 3.4.2 Método Pixel a Pixel: Cor Normalizada

A transformação por cor normalizada pode se colocada na categoria de aritmética *pixel a pixel* de métodos de fusão. Tais métodos manipulam as altas frequências através de funções que envolvem soma e multiplicações entre as imagens de diferentes resoluções espaciais.

A transformação Cor Normalizada – C.N.- (Também referida como uma transformação de subdivisão de energia) é, assim como a transformação IHS, um método idealizado para combinar dados pancromáticos SPOT e imagens Landsat-5 TM. A fusão desses dois tipos de dados produz uma imagem com características espectrais distintas fornecidas pelo sensor TM, enquanto a imagem SPOT fornece uma maior resolução espacial (HALLADA e COX, 1983, apud VRABEL, 1996).

A transformação por cor normalizada consiste na multiplicação de cada uma das três bandas da imagem multiespectral pela imagem pancromática de resolução espacial mais alta, e os valores resultantes são normalizados, dividindo-se pela soma das bandas da imagem multiespectral (VRABEL, 1996). A transformação por Cor Normalizada é então definida matematicamente pela seguinte equação (2):

$$CN_i = \frac{(MSI_i + 1.0) * (PAN + 1.0) * 3.0}{\sum_i MSI_i + 3.0} - 1.0 \quad (2)$$

Onde:

$CN_i$  é a saída da cor normalizada

$MSI_i$  é a banda multiespectral do Landsat-5TM e

$PAN$ , a banda pancromática do sensor SPOT.

A fórmula anterior possibilita que os valores dos *pixels* das imagens híbridas

resultantes sejam escalonados dentro de um intervalo que vai de 0 a 255, e que também é o formato das imagens originais envolvidas na fusão.

As imagens são reamostradas a fim de terem a mesma resolução da banda pancromática, aliás esse procedimento foi efetuado antes da manipulação aritmética dos dados.

Comparado o seu desempenho com o de outros métodos de fusão de imagens, essa transformação mostrou-se como sendo uma das melhores destacando-se em vários aspectos. Segundo VRABEL, 1996, o método demonstrou ser o que melhor conservou as características espectrais das imagens originais, em outras palavras, os valores dos *pixels* sofreram menos degradação durante o processo. Outro aspecto importante tratado pelo autor, é a efetiva GSD (*Ground Sample Distance*), ou seja a distância na superfície equivalente ao tamanho de um *pixel* na imagem resultante da degradação devido ao processo de fusão; com respeito a esse aspecto, registrou-se uma sensível menor degradação para bandas do visível do que para bandas do infravermelho, de qualquer forma, o valor do tamanho do *pixel* da imagem resultante variou em torno de 10% em relação ao tamanho do *pixel* original da imagem de maior resolução. A GDS depende também da fração de fusão ou fator de fusão entre as resoluções espaciais das imagens, sendo menor para frações maiores, como 10:5, 30:15 e 15:5. Infelizmente fator 30:10 não é contemplado, o autor apenas ressalta que possa variar entre 10 e 12m, e ressalta também a escassez de estudos dessa natureza na literatura.

### 3.4.3 Discussão Sobre os Métodos do Domínio Espacial

WELCH e ELEHRS (1987) utilizaram a transformação IHS para fundir dados multiespectrais do SPOT com as imagens Landsat TM. Comparada com os métodos aritméticos *pixel a pixel* desenvolvidos por CLICHE (1985), nos quais foi empregada uma média ponderada da banda pancromática com as bandas do infravermelho como um substituto da componente intensidade, a transformação IHS mostrou, nos resultados, preservar melhor as qualidades espectrais de discriminação do conjunto original de dados. Os métodos *pixel a pixel* alteraram os dados originais, contudo

desempenharam-se tão bem quanto a transformação IHS.

Uma pesquisa semelhante foi realizada por SCHOTT (1989), baseava-se em dados de HAYDN (1982) e nos resultados encontrados por SHORT e STUART (1982), que fundiram dados do infravermelho termal com dados do Landsat MSS. Por outro lado, CARPER et al. (1990) mostraram o uso da transformação IHS para fusão da imagem pancromática com a multiespectral ambas do sensor SPOT.

Ao comparar o método IHS com a Análise da Componente Principal e filtro passa alta, como métodos de fusão de imagens, CHAVEZ et al. (1991) afirmaram que a fusão por IHS foi o método que mais distorceu as características espectrais dos dados originais. Enquanto que o método de adição *pixel a pixel* pelo filtro passa alta preservou as características espectrais. Entretanto EHLERS (1991) demonstrou que o IHS alcançou um nível de discriminação superior aqueles usados por CLICHE (1985) e CHAVEZ (1986), ao utilizar dados do TM com SPOT.

Comparada com a transformação IHS e a fusão por filtro de passa alta, nos trabalhos de CHAVEZ et al. (1991), observou-se que a Componente Principal fornece um resultado similar aos encontrados com a transformação IHS, entretanto possui a vantagem de se poder combinar um número maior que três bandas no processo de fusão.

Resultados encontrados nas pesquisas de CONESE et al. (1992) também se mostraram favoráveis à Análise da Componente Principal. SHETTIGARA (1992) aperfeiçoou essa técnica, caracterizando-a como uma técnica de substituição de componentes, assim como acontece com a transformação IHS. Segundo MUNECHIKA et al. (1993), o emprego do método de fusão pelas Componente Principal proporcionou um aumento significativo na acurácia da classificação, em torno de 6%.

### 3.5 APLICABILIDADES DE IMAGENS HÍBRIDAS

WELCH e ELEHRS (1987) utilizaram imagens de multiresolução do SPOT HRV (“High Resolution visible”) de resolução de 20m fundindo-as com imagens do

Landsat TM, os resultados mostraram-se excelente para a discriminação de feições naturais e culturais no ambiente urbano.

No mapeamento geológico em escala 1:25000, a aplicação da fusão pela transformação IHS com dados do SPOT obtidos nos modos pancromático e infravermelho, representou, segundo GRASSO (1993), uma alternativa de baixo custo e excelentes resultados na representação geomorfológica. A técnica que se baseia na transformação IHS permitiu fundir os dados das bandas do infravermelho (XS) com a banda pancromática de 10m de resolução espacial, de acordo com o mesmo autor, dados do sensor TM, do Landsat, também podem ser fundidos com a mesma técnica. Em ambos os casos encontraram-se resultados satisfatórios aos propósitos dos estudos geológicos. Outro bom exemplo, é o trabalho de CHAVEZ e KWARTENG (1989) que aplicaram imagens fundidas (somente Landsat-5 TM) para o estudo de formações geológicas de superfícies litólicas no norte do estado do Arizona, Estados Unidos, a região possui *canyons* de formação quaternária de cinzas vulcânicas. Com as imagens híbridas foi mais fácil identificar e mapear as áreas de formações de rochas alteradas, com alto teor de hematita, e a variação na quantidade de gipsita.

CHAVEZ e BOWELL (1988) e CHAVEZ et al. (1991) mapearam áreas próximas a Phoenix, Arizona. Foram escolhidos locais distintos: de agricultura, Urbano e geológico. Verificou-se que a utilização das imagens híbridas contribuiu em nível satisfatório para os mapeamentos. Sugerindo confiança na sua aplicação em estudos que envolvam questões ambientais e mapeamento de recursos naturais.

VRABEL (1996) testou vários métodos de fusão, inclusive Cor Normalizada e transformação IHS, em diferentes ambientes, entretanto, ressaltou a importância de se aplicar as fusões em áreas de vegetação, que segundo o autor, são carentes de muita pesquisa. TOUTIN (1998) aplicou fusões estereoscópicas para regiões montanhosas da cadeia da Rochosas, no Canadá. Ambos autores salientaram a falta de pesquisa a respeito da acurácia planimétrica em imagens resultantes de fusão.

No final da década de oitenta, tem início no Brasil os primeiros trabalhos a respeito de fusão de imagens (DUTRA et al., 1988; KURKDJIAN, 1990) os quais tratavam do desenvolvimento de métodos para integração de imagens seguindo o

modelo bayesiano para fusão de imagens pancromática e multiespectral do SPOT (BRUM, 1989; CANDEIAS, 1992).

Ainda no Brasil, trabalhos relativos a estudos intra-urbanos, foram desenvolvidos por PADILHA (1995). Foi possível obter uma alta discriminação eficiente dos elementos da estrutura intra-urbana, considerando-se sua heterogeneidade e complexidade, pela fusão de imagens do SPOT. ALMEIDA et al. (1997) utilizaram técnicas de fusão de imagens IHS, segmentação e classificação por regiões no mapeamento temático de associações solo-vegetação. Para a elaboração do mapeamento detalhado foram fundidas imagens Landsat e fotografias digitalizadas cuja resolução espacial era de 6 metros. Os resultados mostraram vantagens comparados aos convencionais métodos de análise de imagens digitais.

SILVA (1999) mostrou as aplicabilidades da combinação de imagens Landsat-5 TM e RADARSAT no mapeamento geo-ambiental da região de Dourados, Mato Grosso do Sul, verificando uma melhora na interpretação visual das imagens e na acurácia temática da imagem classificada.

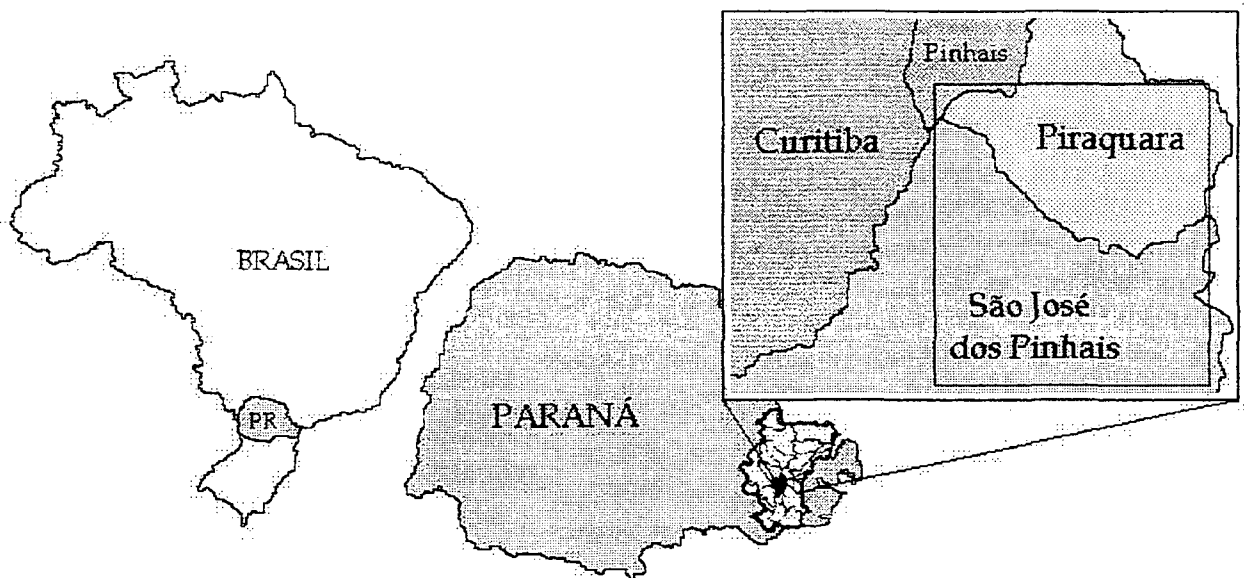
#### 4. MATERIAL E MÉTODO

As seções deste capítulo trazem informações a respeito do material utilizado neste trabalho assim como o método empregado na fusão e classificação das imagens.

##### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

Localizada na região metropolitana da capital paranaense – Curitiba – a área de estudo contemplada para este trabalho (FIGURA 4.1) ocupa uma região de terreno de pouca amplitude altimétrica, perfazendo aproximadamente 261 km<sup>2</sup> (26100ha) de extensão. Envolve parte de três municípios da porção leste da capital: Pinhais, Piraquara e São José dos Pinhais, incluindo zonas urbanas e rurais, que possuem juntos uma população de 287827 habitantes (estimativa do IBGE para o ano 2000) e uma densidade demográfica de 243 hab/km<sup>2</sup>, considerada alta para a média da região metropolitana inteira que é de 157,65 hab/km<sup>2</sup> (COMEC, 1995).

FIGURA 4.1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: Modificada de COMEC, 1995

Além da capital, os municípios de São José dos Pinhais e de Pinhais



registraram, na última década, um grande aumento populacional. Possivelmente em consequência da instalação de novas indústrias na região.

Encontram-se dentro dos limites da área de estudo, cujas as coordenadas estão presentes na TABELA 4.1, áreas de proteção ambiental – APAs - as APAs do rio Piraquara, do rio Iraí e do rio Pequeno, essas duas últimas em processo de regulamentação. A intenção de tais áreas é de proteger o manancial e a mata ciliar que o circunda.

TABELA 4.1 - COORDENADAS DA ÁREA DE ESTUDO

Pontos Extremos	Coordenadas UTM		Coordenadas Geográficas	
	E (m)	N (m)	Latitude	Longitude
Superior esquerdo	686118,275	7184744,147	-25° 26' 32,33"	-49° 08' 57,11"
Inferior direito	700568,275	7166754,147	-25° 36' 10,04"	-49° 00' 10,38"

Situada no setor de maior expansão urbana da região metropolitana Curitiba, o sudeste, a região de estudo concentra um grande número de parques, florestas e mananciais. Tem-se exigido, da comunidade e das autoridades constituídas uma especial atenção quanto à implantação de novas indústrias, depósitos de lixo, expansão de loteamentos ilegais, além do risco de assoreamento das margens dos rios, visto que é importantíssima a conservação os recursos naturais da área.

A seguir são apresentados resumidamente aspectos gerais da área de estudo. O clima, o relevo, a vegetação característica e demografia, são alguns dos itens abordados.

#### 4.1.1 O Relevo

O estado do Paraná possui uma grande diversificação de ambientes. Devido a isso, está dividido em seis grandes compartimentos geopedológicos a saber: O Litoral, a Serra do Mar, o Primeiro, o Segundo e o Terceiro Planalto.

Do ponto de vista geomorfológico, o Estado do Paraná está dividido em 5 grandes regiões geográficas naturais: Litoral; Serra do Mar; Primeiro planalto ou Planalto de Curitiba; Segundo Planalto ou Planalto de Ponta Grossa; Terceiro planalto ou Planalto de Guarapuava. Dentre as quais, a região de estudo localiza-se no primeiro planalto. Segundo MAACK (1968), esse planalto dividi-se em 3 partes distintas, a saber: Planalto de Curitiba, Região Montanhosa do Açungui e planalto do Maracanã, ambas ao norte de Curitiba.

O planalto Curitiba apresenta uma topografia suavemente ondulada, com colinas de topos arredondados, existindo ainda várzea nos principais rios, depósitos fluviais que determinam no local um relevo praticamente plano (EMBRAPA, 1984).

#### 4.1.2 O Clima

De acordo com a classificação de Koeppen, a região apresenta um clima do tipo Cfb, quase sempre úmido com características pluviais de clima quente – temperado. No mês mais quente podem ser registradas temperaturas médias inferiores a 22°C e o restante do ano com médias maiores que 10°C. Possui uma precipitação regular ao longo do ano e formação de geadas durante o inverno; raramente neva e pouco se percebe uma estação tipicamente seca (MAACK, 1968). Segundo dados do IPARDES (1979) e COMEC (1996), a precipitação média anual para a região metropolitana de Curitiba está em torno de 1345 mm, oferecendo excedentes hídricos durante todo o ano.

#### 4.1.3 A Hidrografia

A altitude da região pode variar entre 870 e 1000 m, valores mais altos que esses podem ser encontrados na Serra do Mar, onde se localizam as principais reservas florestais do Estado, em cujas encostas originam-se os veios que alimentam os mananciais e os afluentes do Rio Iguaçu. Pertencentes à grande bacia do Paraná, os

rios Iguaçu e Tibagi são os maiores da região, entretanto podem-se destacar ainda outros rios menores, que contribuem para mesma bacia, dentre eles estão: o Miringuava, o Atuba, o Itaqui, o Iraí, o rio Pequeno e o Piraquara, esses três últimos possuem reservatórios (construídos ou projetados) que captam suas águas.

#### 4.1.4 A Vegetação

Sabe-se que a vegetação expressa a ação do clima em relação a latitude, à altitude e à natureza do solo e, da ação conjunta desses fatores, resulta a ocorrência de determinados tipos de vegetação (IBGE, 1992). Do ponto de vista fisionômico, geralmente, pode ser agrupada em vegetação arbórea e vegetação campestre, que são melhor descritas na seção 4.3.6.1- “Definição das classes”.

## 4.2 MATERIAL

Os dados, equipamentos e programas utilizados estão agrupados de acordo com suas características (TABELAS 4.2 e 4.3).

A TABELA 4.2 traz as principais características das imagens dos satélites e logo em seguida, são relatadas as cartas que constituem o material cartográfico (TABELA 4.3) utilizado nesse trabalho. Maiores detalhes, como a nomenclatura das cartas, podem ser vistos nas referências bibliográficas.

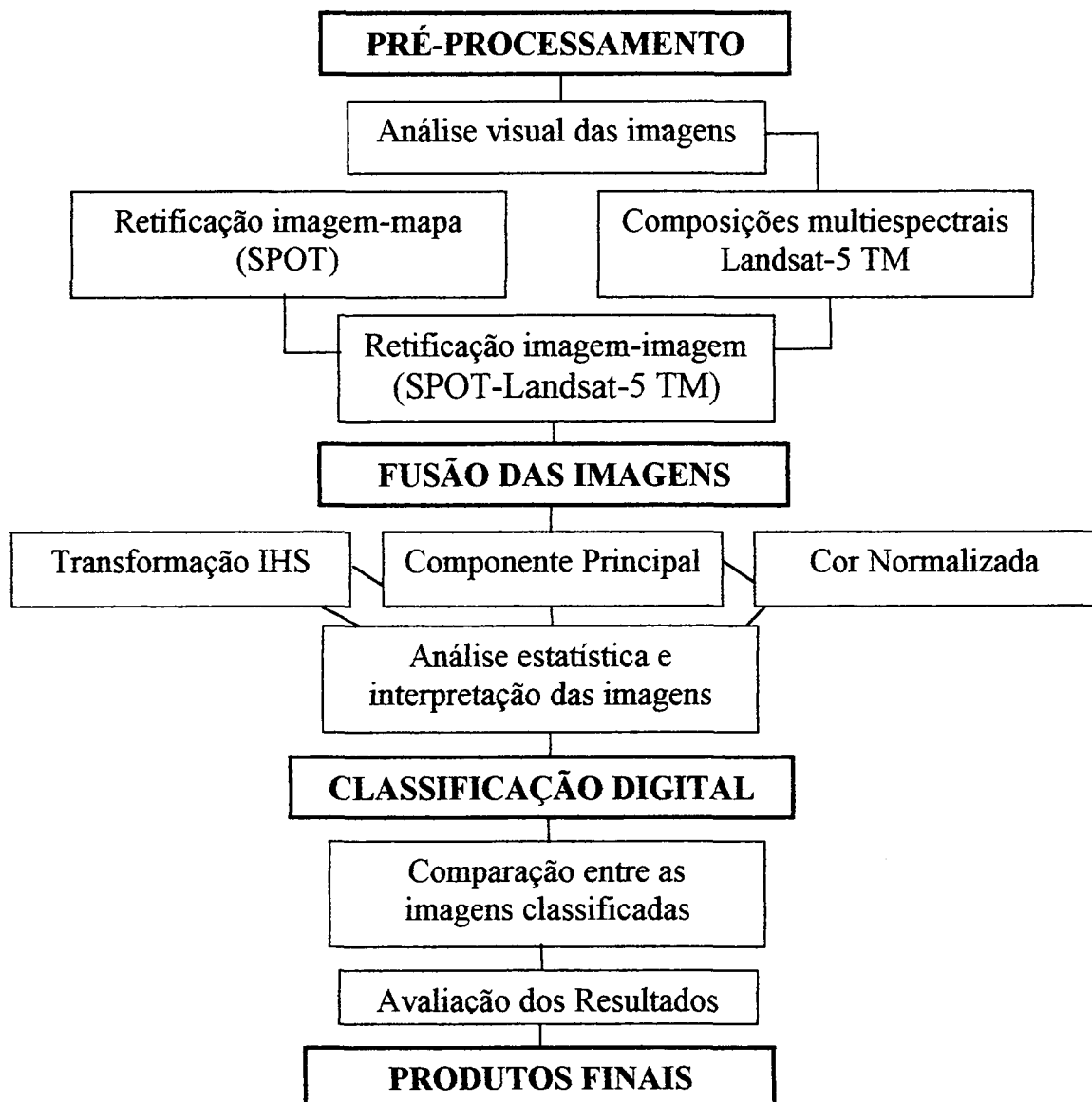
TABELA 4.2 - MATERIAL CARTOGRÁFICO E DE APOIO

Categoria	Descrição do Material	Fonte
Documentos cartográficos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cartas do IBGE,</li> <li>• Cronaflex do COMEC, em escala 1:10000</li> </ul>	IBGE (1985) e UNIBASE (1976/1985)
Programas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MaxiCad versão 12 e Envi 3.2</li> </ul>	COMEC e CPGCG

### 4.3 MÉTODO

O resumo da sequência metodológica é apresentada na forma de um fluxograma (FIGURA 4.2), no qual estão descritos os procedimentos desenvolvidos nas etapas de pré-processamento, fusão das imagens e classificação digital.

FIGURA 4.2 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA



#### 4.3.1 Análise Visual das Imagens

Como parte inicial do pré-processamento, as bandas do Landsat-5 TM foram identificadas em seus arquivos de origem, por meio das análises de histogramas e do

conhecimento do comportamento espectral de corpos d'água, vegetação e solo em relação às bandas, que ajudaram na identificação das bandas.

TABELA 4.3 - INFORMAÇÕES SOBRE AS IMAGENS.

Características	Landsat-5 TM	SPOT
Bandas	3, 4, 5 e 7	Pancromática (modo P)
Órbita	Base: 220 Ponto 078	Ponto 712-400
Data da obtenção	18/04/96	13/05/96
Resolução do pixel	30 m	10 m
Área de abrangência	92x92 km (quadrante A)	60x60km
Quantização de pixel	8 bits	8 bits
Nível de processamento	Correção geométrica ao longo da linha	1B*

\*O nível 1B refere-se às aplicações de correções radiométricas relativas aos detetores e correções geométricas do sistema, em relação à rotação da terra e à trajetória do satélite.

A verificação do estado das imagens Landsat-5 TM e da banda SPOT pancromática (TABELA 4.3) teve o propósito de se perceber a existência de ruídos ou outro problema relativo às linhas e colunas que compõem as imagens. Como somente as bandas TM1 e TM2 apresentaram muitos ruídos, elas não foram utilizadas neste trabalho. A banda 3 do sensor TM ( $0,63 - 0,69\mu\text{m}$ ) e a imagem SPOT pancromática ( $0,51$  a  $0,73\mu\text{m}$ ), as quais pertencem à faixa do espectro visível, foram avaliadas com respeito às possíveis interferências do efeito atmosférico. A fim de decidir sobre a necessidade de correção desse efeito, fez-se uma avaliação das regiões de sombras, onde se esperava encontrar valores próximos de zero, o que se confirmou pela observação dos valores dos níveis de cinza. Este fato dispensou a necessidade de retificação radiométrica. As bandas 4, 5 e 7, não foram afetadas pelo efeito atmosférico, pelo fato de se localizarem na região do infravermelho (CHAVEZ, 1992).

As bandas 3, 4, 5, e 7 do sensor TM, assim como a banda pancromática do

SPOT, não apresentaram problemas radiométricos, possibilitando avançar com o processamento.

#### 4.3.2 Correção Geométrica

A primeira etapa no processo de retificação de uma imagem de satélite, consiste na escolha de pontos identificáveis comuns à imagem e ao mapa. Os quais são usados para corrigir geometricamente a imagem, ou seja, referenciá-la a um sistema de coordenadas.

##### 4.3.2.1 Retificação da imagem SPOT pancromática

Os pontos usado na retificação foram observados na imagem SPOT, escolhidos e marcados na cópia heliográfica da carta 1:50000 (IBGE, 1985), totalizando 21 pontos selecionados distribuídos homogeneamente por toda a imagem. A resolução de 10 metros da banda pancromática facilitou no processo de identificação. Os pares de coordenadas UTM foram obtidos por meio da digitalização dos pontos nas cartas em cronaflex, escala 1:10000 (UNIBASE, 1976 e 1985) Cada par de coordenadas digitalmente coletado das cartas 1:10000 gerou um par de coordenadas (x, y) referentes ao sistema de coordenadas das linhas e colunas da imagem.

Utilizando-se o método de reamostragem pelo vizinho mais próximo, a imagem SPOT foi geometricamente corrigida. Esse método tem a vantagem de conservar as características espectrais da imagem. A imagem SPOT pancromática foi retificada segundo uma transformação afim, utilizando um modelo polinomial de primeiro grau, aplicada ao conjunto de pontos de controle.

Uma tabela com os pontos de controle usados para a retificação da imagem SPOT pancromática e listagem dos erros (RMS) para cada ponto, encontra-se no APÊNDICE 1 e os erros da correção geométrica são apresentados no capítulo de resultados e discussões (TABELA 5.1).

#### 4.3.2.2 Registro das imagens Landsat-5 TM e SPOT

Com a imagem pancromática retificada, efetuou-se o registro das bandas 7, 5, 4 e 3 do Landsat-5 TM. Foram determinados pontos comuns nas imagens, totalizando 18 pares de coordenadas. A seleção e coleta desses pontos ocorreu de forma similar àquela efetuada no processo de retificação: os pontos identificados em ambas as imagens geram pontos de coordenadas de imagem (X, Y). Vale considerar que os pontos da imagem SPOT já estão associados ao sistema de coordenadas UTM. Assim como no processo de retificação, na escolha do conjunto de pontos de controle, tomou-se o cuidado de manter a homogeneidade da distribuição dos pontos por toda a imagem.

No registro das imagens Landsat-5 TM com a imagem pancromática retificada, optou-se por fazer a reamostragem entre os *pixels* das imagens resoluções espaciais distintas pelo método da convolução cúbica que, segundo SCHOWENGERDT (1980), é melhor do que o método da interpolação bilinear por manter os níveis de cinza originais. Os resultados a esse respeito são apresentados e discutidos no capítulo cinco.

#### 4.3.3 Fusão das Imagens

Os métodos aqui empregados, transformação Cor Normalizada, transformação IHS e pela Componente Principal, são classificados como: o primeiro deles, como método aritmético *pixel a pixel* e os dois últimos como método de transformação de espaços e substituição (CARPER et al. 1990 e SHETTIGARA, 1992). Os três métodos de fusão, citados, serão vistos com mais detalhes a seguir.

##### 4.3.3.1 Fusão por transformação IHS

O sistema de coordenadas baseia-se nos eixos correspondentes a intensidade (*Intensity* - I), matiz (*Hue* - H) e saturação (*Saturation* - S) (FIGURA 3.8, capítulo

anterior), portanto qualquer conjunto de três bandas do RGB pode ser transformado para o espaço IHS. O fato de usar apenas três bandas, pode ser o fator limitador no caso em que seja interessante ou necessário trabalhar com um maior número de bandas (PELLEMANS et al., 1993). Uma das maiores vantagens deste sistema pode ser vista pela melhoria da interpretabilidade nas composições multiespectrais.

Para ser utilizada como método de fusão de imagens, a transformação IHS, que era inicialmente aplicado para melhorar da interpretabilidade de uma imagem, passou por algumas adaptações (CHAVEZ et al., 1991; PATTERSON et al., 1992; EHLERS et al. 1991; PELLEMANS et al., 1993). Pode-se resumir a seqüência do método nos passos detalhados abaixo:

- 1) As bandas 5, 4 e 3 do sensor TM, de resolução espacial mais baixa, foram transformadas do espaço RGB em três componentes do espaço IHS. O mesmo foi feito para o conjunto de bandas 7, 5 e 3, cuja a justificativa para utilização é apresentada no decorrer deste capítulo.
- 2) Segundo CHAVEZ e BOWELL (1988); CHAVEZ et al. (1991); PATTERSON et al. (1992); PELLEMANS et al. (1993) a manipulação do contraste, indicada por preservar o colorido, deve ser aplicada à imagem de resolução espacial mais alta, no caso a banda pancromática do sensor SPOT, de forma que ela passe a ter mesma média e variância que a componente de Intensidade “I”, ficando assim muito semelhante a essa componente.
- 3) No processo de substituição, segundo WELCH e EHLERS (1987), a imagem pancromática tem seus valores de DN (*Digital Number*), ou seja valores de tons de cinza, substituídos pelos valores de cinza dos *pixels* da componente I (intensidade). Isso pode ser feito porque parte-se do princípio de que as imagens tem aproximadamente as mesmas características espectrais. Em outras palavras, a “nova” componente de intensidade I possui então, a resolução espacial de 10m da imagem pancromática e os valores dos *pixels* em termos de intensidade, pertencendo ainda ao espaço IHS. A componentes H e S, que contêm as demais informações, têm seus *pixels* reamostrados (aqui pelo método da convolução cúbica), para estarem na mesma resolução espacial de 10 m.



- 4) Fez-se necessária, portanto, a operação de inversão das componentes do espaço IHS para o RGB: Pela aplicação de uma transformação inversa, volta-se às coordenadas do espaço RGB, obtendo-se assim as bandas híbridas, as quais possuem a resolução espacial de 10m, do SPOT, e características espectrais semelhantes às bandas originais do sensor TM .

#### 4.3.3.2 Fusão por Componente Principal

Segundo SHETTIGARA (1992) e CHAVEZ e KWARTENG (1989), o método da fusão de imagens por componente principal baseia-se na substituição da primeira componente pela imagem de resolução maior, a qual pode ser contrastada de forma a ter média e variância próximas às da primeira componente. Devido à possibilidade que o método oferece em se poder utilizar um número maior que três bandas na fusão com a banda pancromática do SPOT. Foram testados três conjuntos de composições de bandas: o primeiro contendo as bandas 5, 4 e 3, o segundo com as bandas 7, 5 e 3 e outro com as bandas 7, 5, 4 e 3. As etapas para realizar a fusão por componente principal são as seguintes:

- 1) A transformação para espaço RGB, a partir dos três conjuntos de composições de bandas do Landsat-5 TM, foram calculados os três conjuntos de componentes principais, resultando nas componentes PC1, PC2, PC3 e PC4 (no caso do terceiro conjunto, que possui quatro bandas).
- 2) A manipulação do contraste foi feita semelhantemente ao procedimento que foi adotada na transformação IHS, baseada no cálculo das estatísticas (média e variância) e na correlação existente entre a primeira componente (PC1) e a imagem pancromática, para que esta possa ter características espectrais semelhantes às da primeira componente PC1, porém com uma resolução espacial maior.
- 3) A substituição: A primeira componente é substituída pela imagem contrastada (banda pancromática do SPOT de resolução espacial de 10 metros). Isso pode ser feito porque assume-se que as imagens tem agora, características espectrais semelhantes. As outras componentes principais (PC2, PC3, e PC4) são então

reamostradas para que tenham a mesma resolução espacial, antes de se proceder a operação inversa para o espaço RGB.

- 4) A inversão com a “nova” componente PC1 é baseada da inversa da matriz de rotação, que gerou a Componente Principal (etapa 1). Procede-se com inversão do espaço da Componente Principal para o espaço RGB pela aplicação de uma transformação inversa, voltando-se às coordenadas do espaço RGB, no qual todas as imagens híbridas possuem a resolução espacial da banda pancromática do SPOT.

#### 4.3.3.3 Fusão pela Cor Normalizada

De forma similar aos procedimentos de registro de imagens adotados para a fusão dos dados pela transformação IHS, foram fundidas com a imagem pancromática do sensor SPOT dois conjuntos de composições de bandas: 5, 4 e 3, e 7, 5 e 3, ambas do sensor TM. Embora um pouco mais escuras, pôde ser observado que as imagens geradas possuíam um aspecto visual melhor que as mostradas pela composição original com as bandas originais do TM. As discussões a respeito das imagens híbridas resultantes são apresentadas no capítulo 5.

#### 4.3.4 Análise das Imagens Híbridas

A análise visual das imagens foi efetuada a fim de compará-las entre si e em relação aos dados originais do sensor TM. Avaliou-se interpretabilidade de cada uma e a discriminação dos tipos de feições que se pretende classificar, e complementando essa avaliação, utilizou-se da análise das matrizes de correlação.

#### 4.3.5 Correlação entre as Imagens

As matrizes de correlação entre as imagens podem ser um indicador de quanto as características das feições podem ser discriminadas no processo de classificação

digital. Para cada grupo das imagens, originais e híbridas resultantes da fusão SPOT e Landsat-5 TM, foram calculadas as matrizes de correlação. Essas se constituem numa maneira de analisar estatisticamente a redundância de informações presentes nas imagens, bem como avaliar a semelhança espectral entre as imagens. Os resultados e as discussões serão mostrados na seção 5.2.1.2 “Análise da correlação”.

#### 4.3.6 Classificação Digital

Na classificação digital das imagens originais e híbridas, optou-se pelo processo de classificação supervisionada, o qual permite interferência direta do usuário na identificação dos *pixels* de acordo com as categorias que se deseja classificar, baseado em uma regra estatística preestabelecida. Obtendo-se assim uma maior fidelidade à realidade de campo na geração do produto final, o mapa.

A determinação das áreas de treinamento foi baseada no reconhecimento visual das feições, utilizando-se para isso as composições com as bandas 5, 4 e 3 do sensor TM e as imagens híbridas resultantes. O algoritmo usado na classificação foi o de Máxima Verossimilhança (também conhecida por máxima probabilidade). Segundo RICHARDS (1986) e BOLSTAD e LILLESAND (1991), este é o método que oferece melhor desempenho na classificação de imagens de satélite. A função que calcula a máxima probabilidade (caso geral) de um pixel pertencer a uma determinada classe, é dada pela equação (3):

$$P(w | x) = \frac{P(w | x) \cdot P(w)}{P(x)} \quad (3)$$

Onde:

$P(w|x)$  - Probabilidade condicional de  $w$  dada a ocorrência de  $x$

$P(x|w)$  - Probabilidade condicional de  $x$  dada a ocorrência de  $w$

$P(w)$  - Probabilidade de ocorrência do evento  $w$

$P(x)$  - Probabilidade de ocorrência do evento  $x$

Usou-se neste trabalho um algoritmo cuja a formulação é um caso particular da equação (3), quando se considera as probabilidades iguais de ocorrência, chamado de

função discriminante e dado pela expressão (4):

$$P_C = \{-0.5 \log_e [\det (V_C)]\} - [0.5 (X - M_C)^T V_C^{-1} (X - M_C)] \quad (4)$$

Onde:

$$P_C \geq P_i$$

i = possíveis classes 1, 2, 3, 4, 5, ..., n

$V_C$  – Matriz de Covariância

$M_C$  – Média das n Bandas

X – Vetor de mensuração

O método de Máxima Verossimilhança (probabilidade gaussiana) assume que as áreas de treinamento seguem uma distribuição normal e que as classes têm igual probabilidade de ocorrência.

#### 4.3.6.1 Definição das classes

A definição das classes teve início considerando-se as características da paisagem da região de estudo, com base na visita ao campo; na análise visual das imagens e no material bibliográfico relativo à área. Em princípio, foram escolhidas nove classes, mas que de fato totalizaram doze classes, pois foram consideradas para as classes relativas à tipologia da vegetação, as regiões sob sombra. Os nomes das classes são listados a seguir:

- |  |   |
|--|---|
| 1- Água  | 6- Mata remanescente (secundária)                                       |
| 2- Área Urbana   | 7- Solo exposto   |
| 3- Floresta Ombrófila Mista alterada                           | 8- Reflorestamento de eucalipto   |
| 4- Várzea  | 9- Vegetação sob sombra (subdividida em:                                |
| 5- Floresta ciliar (vegetação arbustiva das áreas ribeirinhas) | Floresta Ombrófila Mista alterada, reflorestamento e Mata remanescente) |

Com o desenvolvimento do processo de classificação, foi adequado adotar 12

classes, considerando-se também as subdivisões, que são reflorestamento e a Florestas Ombrófila Mista e Mata Remanescente, todas sob sombra.

Quanto à descrição das classes de vegetação, seguiu-se a classificação adotada pelo IBGE (1985), pode-se dar um breve esclarecimento a respeito das principais tipologias utilizadas neste trabalho. As regiões Fitogeográficas ou fitoecológicas do Estado do Paraná, segundo a classificação do IBGE, que foram contempladas na área de estudo, podem ser resumidas assim:

Região da Floresta Ombrófila Densa (Floresta Atlântica)

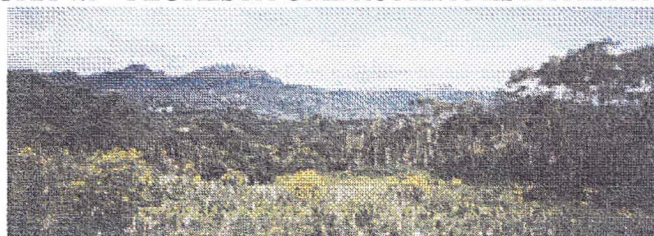
Região da Floresta Ombrófila Mista (Floresta de Araucária)

Considerando as áreas de tensão, temos três então:

Floresta Ombrófila Densa com a Região da Floresta Ombrófila Mista

A tipologia florestal está subdividida em floresta subtropical perenifólia e subtropical de várzea, ambas classificadas como floresta ombrófila mista, esta floresta, também conhecida como mata de araucária ou pinheiral, é um tipo de vegetação do planalto Meridional, onde ocorre com maior frequência. Na FIGURA 4.3 pode ser visto panorama geral da floresta ombrófila mista, com a Serra do Mar ao fundo.

FIGURA 4.3 - FLORESTA OMBRÓFILA MISTA ALTERADA



Mais resistentes ao frio, essas florestas apresentam clareiras e, às vezes, vegetação rarefeita e menos exuberante do que a floresta tropical, são facilmente identificadas pela presença da pinheiro-do-Paraná, a *Araucaria angustifolia*. Em geral apresenta árvores de médio porte e de folhas pequenas, embora haja indivíduos de grande porte cujo o caule apresenta um diâmetro largo. A floresta original, praticamente desaparecida, é do tipo perenifólia, apresentando três extratos bem definidos em seu perfil: o extrato superior é normalmente dominado pela presença de Araucárias (*Araucaria angustifolia*) em associações com a Imbuia (*Ocotea porosa*), com a canelalageana (*Ocotea pulchella*), com cedro (*Cedrela fissilis*) e também com a bracatinga



(*Mimosa scabrella*). O extrato médio pode apresentar pinho-cravo (*Podocarpus lamberti*), Guaramirin (*Eugenia sp.*) e erva-mate (*Ilex paraguariensis*); e no extrato inferior, ocorrem espécies de gramíneas e aspectos da quinta fase da sucessão natural (arbustos com instalação de epífitas).

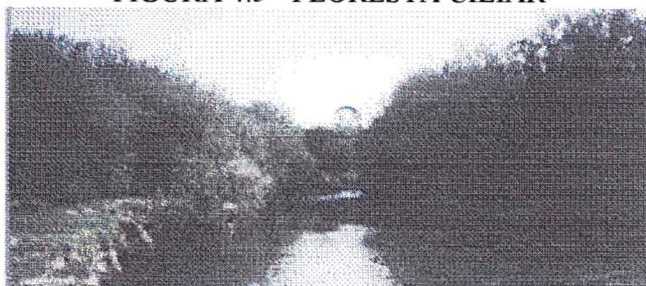
Hoje a floresta secundária ocupa a maior parte da vegetação florestal. Ela substituiu a vegetação original, é constituída por maciços de bracatinga (*Mimosa scabrella*) com aspecto perenifólio. Também podem ocorrer, isoladas ou em maciços, outras espécies como o alecrim (*Holocalix balansae*), nas áreas de pousio (áreas de cultivo interrompido). Na FIGURA 4.4 pode-se ver um exemplo de Floresta Ombrófila mista alterada.

FIGURA 4.4 - FLORESTA OMBRÓFILA MISTA, PRÓXIMO À BR-277



Quanto à vegetação não arbórea da área em questão, pode-se dizer que é composta pelos campos subtropicais naturais, secundários e pelas várzeas úmidas (FIGURA 4.6), em outras palavras, há ocorrência de áreas de campos limpos – ou estepe gramíneo-lenhosa- e várzea aluviais- que são áreas de formações pioneiras com influência fluvial. Na FIGURA 4.5 pode-se observar o aspecto da Floresta ciliar, localizada nas áreas próximas aos rios, neste caso às margens do rio Pequeno.

FIGURA 4.5 - FLORESTA CILIAR



Elas discernem entre si pelo espaço de ocorrência: Os campos limpos ocorrem

em terreno de relevo suavemente ondulado (um pouco acidentado) enquanto que as várzeas aluviais ocupam exclusivamente áreas de relevo plano (as planícies aluviais) influenciadas pelo regime hídrico do rio. Na FIGURA 4.6 tem-se uma planície, localizada no sopé da serra do mar, que exemplifica as áreas usadas como pastagem.

FIGURA 4.6 - PASTAGENS EM ÁREA DE VÁRZEA ALTERADA



Pôde ser observado no campo que as áreas de várzeas alteradas estão quase sempre tomadas por pastagens, com vestígio de queimadas ou pousio, isso talvez ajude a explicar as confusões cometidas pelo classificador, para as classes várzea e solo exposto.

A classe reflorestamento de eucaliptos cuja a idade varia em torno de 3 a 4 anos (FIGURA 4.7) pode ser verificada somente em uma região da imagem, pois devido à defasagem temporal, na outra região (que continha um reflorestamento de pinus) foi cortado há dois anos, segundo informações de antigos moradores do local.

FIGURA 4.7 - REFLORESTAMENTO DE EUCALIPTOS



É possível ver porções com ambas espécies espalhadas em toda extensão da área coberta por vegetação, o que pode explicar as pequenas manchas (às vezes pontos) dessa classe, em meio as outras, nas imagens classificadas.

Com o intuito de apenas esclarecer o significado de sucessão secundária, pode-se pensar na seguinte situação: quando se abandona uma área sem vegetação, a

natureza se encarrega de transformá-la numa floresta, este processo longo é denominado de sucessão secundária, que pode demorar de 30 a 60 anos. Primeiramente se desenvolvem as espécies herbáceas anuais (plantas daninhas); após essa fase surgem espécies herbáceas perenes e logo em seguida espécies perenes arbustivas; para então virem as primeiras espécies pioneiras de porte arbóreo. Quando ocorre o sombreamento do solo, surgem as espécies secundárias (fase intermediária), até o que aparecimento de plantas climaxes, forneça-lhes o aspecto de floresta madura ou primária. Esse processo pode ser mais rápido em regiões quentes e úmidas, e próximo de locais onde já haja florestas, também pode ser interrompido e reiniciado ao menor distúrbio, como ocorrência de incêndio, vendaval com queda de plantas, desmatamento etc. (LORENZI, 1992).

#### 4.3.6.2 Avaliação estatística das amostras de treinamento

Com o propósito de analisar a separabilidade entre as classes, foi adotada a análise das matrizes de erro (também chamadas de matrizes de contingência), para quais as áreas de treinamento são consideradas como verdadeiras em campo e comparadas com a imagem classificada, tendo-se assim a quantidade de *pixels* (também pode ser expressa em termos de percentagem) de uma determinada classe que foi confundida com os *pixels* de outra classe.

Na seleção das áreas de treinamento ou regiões de interesse, elas foram definidas por polígonos (SWAIN, 1978) cujo tamanho foi determinado pela expressão:

$$P > 10 n \quad (5)$$

Onde:

P é o tamanho da amostra e

n é o número de bandas usadas na classificação.

Ao término da definição de cada polígono, foi feita uma classificação por polígono, a fim de verificar se a amostra era representativa. Através de análise estatística, verificou-se se essas amostras possuíam uma distribuição normal, que é



primordial nos cálculos para método de classificação o método de máxima probabilidade (CHUVIECO, 1990).

Por esse método, além das bandas originais Landsat-5 TM, também foram classificadas as imagens híbridas resultantes das fusões pelos processos de transformação IHS e cor normalizada e Componente Principal.

#### 4.3.6.3 Verificação da classificação digital

As visitas à área de estudo tiveram como principal propósito confrontar a ocorrência das classes que foram definidas na classificação das imagens com a realidade de campo. Além de permitir a coleta de amostras para a aferição da classificação. É importante salientar que devido à defasagem temporal, os alvos referentes à água e área urbana foram conferidos na imagem mostrada na tela.

A verificação em campo, foi auxiliada com as imagens classificada e a imagem híbrida resultante da fusão por componente principal por oferecer uma grande variação tonal, permitindo a visualização dos detalhes a serem identificados em campo. Através dessa checagem, pode-se determinar as classes que correspondem à realidade de campo. Mais detalhes sobre a confronto entre os dados da classificação e a realidade no campo, são apresentado no capítulo 5, “Resultados e discussões”. O número de amostras sugerido, segundo FITZPATRICK-LINS (1981), é dado pela expressão:

$$N = Z^2 (P)(Q)/E^2 \quad (6)$$

Onde:

P é o percentual de acurácia esperado

Q=100-P

Z é o desvio padrão, normalmente de valor igual a 2

E é o erro permitido.

Os resultados obtidos com aplicação da expressão (6) estão na seção 5.3.1 “Análise da Separabilidade entre as classes”.

#### 4.3.7. Pós-Classificação

Com base nas análises dos dados obtidos na verificação de campo e verificação da classificação digital, foram geradas as matrizes de contingência e em seguida, fez-se o cálculo do coeficiente de concordância total e do coeficiente *Tau* (MA e REDMOND, 1995), que indica ao usuário o nível de acurácia do mapa gerado. A formulação do coeficiente *Tau*, descrita por MA e REDMOND (1995), é dada a seguir:

$$T = \frac{P_o - 1/M}{1 - 1/M} \quad (7)$$

Onde:

$$P_o = \sum_i^M P_{ii} = \frac{1}{N} \sum_i^M n_{ii} \quad (8)$$

$n_{ii}$  são os elementos da diagonal principal

M é o número de classes

N é número total de pixels

A aplicação dessas expressões enquadra-se no caso das probabilidades iguais, tendo-se portanto:

$$P_{ii} = n_{ii} / N \quad (9)$$

Os resultados e os comentários são abordados na seção 5.3.2 “Análise da Classificação digital”.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados, ao passo que são abertas discussões referentes à fusão e à classificação das imagens, confrontando com o que se encontra na literatura.

### 5.1 CORREÇÃO GEOMÉTRICA

Antes de serem processadas as fusões das imagens, fez-se necessária a correção geométrica. Para tanto, procedeu-se primeiramente a retificação da imagem SPOT pancromática, que foi orientada baseada em cartas do COMEC (1995), tendo suas coordenadas no sistema UTM, referentes ao fuso 22. Em seguida, as imagens do Landsat-5 TM foram registadas segundo a imagem pancromática georreferenciada.

#### 5.1.1 Retificação da Imagem SPOT Pancromática

Utilizando-se o método de reamostragem pelo vizinho mais próximo, a imagem SPOT foi retificada segundo uma transformação afim aplicada ao conjunto de 21 pontos de controle. O erro quadrático médio (RMS) foi de 0.3835 *pixel*, equivalente a 3,84 metros (TABELA 5.1), concordando com o exposto em WELCH et al. (1985) e em BORGESON et al. (1985). Portanto dentro dos padrões aceitáveis de precisão.

#### 5.1.2 Registro das imagens Landsat-5 TM e SPOT

Efetuuou-se o registro das bandas 7, 5, 4 e 3 do Landsat-5 TM em relação à imagem SPOT retificada. A reamostragem entre os *pixels* das imagens de resoluções espaciais distintas foi realizada pela convolução cúbica. Este método mostrou-se melhor do que o método da interpolação bilinear, que também pode garantir uma definição satisfatória dos detalhes das feições. Segundo SCHOWENGERDT (1984) a convolução cúbica mostrou-se como o método mais indicado para registro de imagens

de diferentes resoluções espaciais, ao passo que DIKSHIT e ROY (1996) ressaltaram, em seu experimentos empíricos, haver um ganho significativo na classificação de imagens por ambos os métodos de reamostragem (interpolação bilinear e convolução cúbica), destacando uma diferença de 0,8% a favor da interpolação bilinear em relação à convolução cúbica. Justifica-se portanto, a escolha deste último como apropriado para o registro das imagens usadas neste trabalho. Utilizou-se uma transformação afim aplicada ao conjunto de 18 pontos de controle.

TABELA 5.1 - ERROS DA CORREÇÃO GEOMÉTRICA

Correção Geométrica	Erro Médio Quadrático	
	Em <i>pixel</i>	Em metros
Imagem (SPOT) – mapa	0,3835	3,84
Landsat-5 TM – SPOT	0,3501	10,50

A TABELA 5.1 resume os erros cometidos na retificação da imagem SPOT (ou retificação imagem-mapa) e no registro da imagens Landsat-5 TM (retificação imagem-imagem) para o qual o erro médio quadrático foi de 0.3501 *pixel*, o que equivale a 10,50 metros (TABELA 5.1) na imagem Landsat. Os valores dos erros obtidos em cada ponto usado no registro da imagem Landsat se encontram no APÊNDICE 2.

## 5.2 FUSÃO DAS IMAGENS

Através dos procedimentos de fusão, pelos três métodos descritos nas seção 3.4 (“Métodos de fusão de imagem de satélite”) aplicados a três grupos de imagens (TABELA 5.2), foram geradas sete imagens híbridas com resolução espacial de 10 metros, as quais foram também classificadas juntamente com as bandas originais do sensor TM, totalizando oito imagens classificadas. Visando facilitar o entendimento geral das imagens processadas, elas foram nomeadas de acordo com os grupos de imagens que lhe deram origem. Doravante poderá referir-se a essas imagens, segundo os nomes presentes na TABELA 5.2. É importante ressaltar que os nomes das bandas, resultantes das fusões, serão seguidos de apóstrofe (') para diferenciar das bandas

originais do sensor TM.

TABELA 5.2 - IMAGENS ORIGINAIS E HÍBRIDAS RESULTANTES

IMAGENS ORIGINAIS (R G B)	GRUPO	MÉTODO DE FUSÃO		
		CN	IHS	CP
TM 5 4 3	G1	CNG1	IHSG1	CPG1
TM 7 5 3	G2	CNG2	IHSG2	CPG2
TM 7 5 4 3	G3	Não houve fusão		CPG3
TM 5 4 3	Original	Não houve fusão		

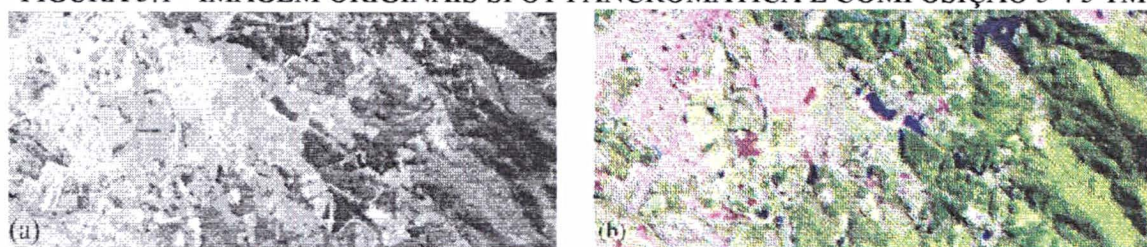
CN: Cor Normalizada

IHS: Fusão por Transformação IHS e,

CP: Fusão por Componente Principal.

De maneira geral, foi possível observar um considerável ganho na interpretabilidade das feições, devido ao aumento da resolução espacial, quando foram utilizadas imagens resultantes das fusões entre as imagens originais do SPOT (FIGURA 5.1-a) e do Landsat-5 TM (FIGURA 5.1-b). O detalhamento das feições deveu-se a alta resolução espacial da imagem SPOT e a maior parte da informação espectral proveio das bandas do Landsat-5 TM. As imagens resultantes de seus respectivos processos de fusão são apresentadas no decorrer do capítulo.

FIGURA 5.1 - IMAGEM ORIGINAIS SPOT PANCROMÁTICA E COMPOSIÇÃO 5 4 3 TM



A composição das bandas originais 5 4 e 3 (G1) proporcionou uma identificação de feições e padrões tonais próximos ao colorido natural, bem como a variação tonal entre os tipos de solos e de vegetação. Devido à resolução espacial de 30 metros do TM, somente as estradas mais largas podem ser observadas, assim como

é possível identificar somente as principais vias de uma zona urbana (FIGURA 5.1-b).

Sabe-se que matrizes de correlação demonstram o quanto os dados estão associados entre si. Através da análise dessas matrizes pode-se verificar se ocorre similaridade entre a natureza dos pares de dados. Elas podem também indicar o quanto os dados originais foram alterados após a fusão. No estudo em questão, as análises tiveram início pela comparação da correlação das bandas originais (TABELA 5.3) entre si e destas com a SPOT pancromática (TABELA 5.4).

TABELA 5.3 - CORRELAÇÃO ENTRE AS BANDAS ORIGINAIS TM

Bandas	B7	B5	B4	B3
B7	1,000	0,918	0,263	0,875
B5	0,918	1,000	0,481	0,812
B4	0,263	0,481	1,000	0,219
B3	0,875	0,812	0,219	1,000

A alta correlação existente entre as bandas pancromática e as do sensor de baixa resolução espacial (resultados apresentados e discutidos mais adiante nas TABELAS 5.6, 5.9, 5.10, 5.13, 5.14 e 5.15), é colocada por CLICHE et al. (1985) como sendo um importante fator para um desempenho satisfatório dos métodos de fusão de imagem, bem como que as bandas utilizadas sejam espectralmente próximas. Por outro lado, a baixa correlação entre as bandas do sensor TM, como a que ocorre com as bandas 3 em relação banda 4 (cuja utilização é importante para a discriminação dos tipos de vegetação), é apontada por TOWNSHEND (1984), como um fator relevante no aumento da capacidade de discriminação dos alvos. Vale lembrar que a capacidade de discriminar alvos, isto é, separá-los em classes distintas, é de fundamental importância na classificação das imagens. Pode-se ver na TABELA 5.3 as correlações entre as bandas originais do sensor TM.

TABELA 5.4 - CORRELAÇÃO ENTRE AS IMAGENS ORIGINAIS E A BANDA SPOT PANCROMÁTICA

Banda	B7	B5	B4	B3
Pan	0,777	0,745	0,291	0,876

Pode-se ver na TABELA 5.4 que houve uma maior correlação da banda 3 com

a pancromática, também é possível notar que as bandas do infravermelho possuem uma alta correlação com a banda pancromática, com exceção da banda 4. Foi a partir da constatação desse fato que tornou-se interessante fundir também as bandas 7, 5 e 3 TM (grupo G2) com a SPOT pancromática, sendo esse o grupo que apresentou a maior correlação entre as suas bandas (TABELA 5.5).

TABELA 5.5 - CORRELAÇÃO ENTRE AS BANDAS ORIGINAIS DO GRUPO G2

Bandas	B7	B5	B3
B7	1,000	0,918	0,875
B5	0,918	1,000	0,812
B3	0,875	0,812	1,000

Ao longo deste capítulo, são mostradas as matrizes de correlação da banda SPOT pancromática com as bandas das imagens resultantes das fusões. Com respeito à avaliação das matrizes de correlação, vale salientar o seguinte: em relação aos métodos de fusão pelas transformações IHS e componente principal, mostrou-se o processo parcial, para ver quais seriam as relações da componente I (no caso da fusão pela transformação IHS) e da primeira componente principal, com a banda pancromática, conforme a teoria exposta no capítulo 3 (seções 3.4.1 “Fusão por Transformação IHS” e 3.4.2 “Transformação por Componente Principal”, ambas do capítulo “Revisão Bibliográfica”). Para o método cor normalizada isso não foi possível, pela própria natureza do método (que não é um método de substituição de banda). Mesmo assim foi calculada a correlação para as imagens híbridas CN ( Cor Normalizada) e a banda pancromática.

### 5.2.1 Fusão por Cor Normalizada

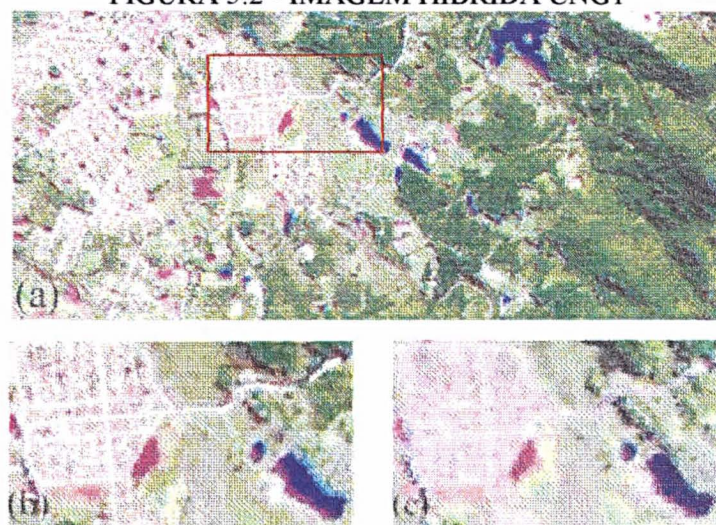
Após obtenção das imagens híbridas pela fusão por Cor Normalizada, conforme o processo apresentado nas seções 3.4.2 e 4.3.3.3 dos capítulos anteriores, foi efetuada a avaliação das imagens resultantes quanto à sua potencialidade para a interpretação visual.



### 5.2.1.1 Interpretação das imagens

Constatou-se uma melhora nos detalhamentos das feições na imagem resultante da fusão pelo método da cor normalizada (FIGURA 5.2 a e b) ao comparar-se com as originais Landsat-5 TM (FIGURA 5.2 c), trazidas em detalhe.

FIGURA 5.2 - IMAGEM HÍBRIDA CNG1



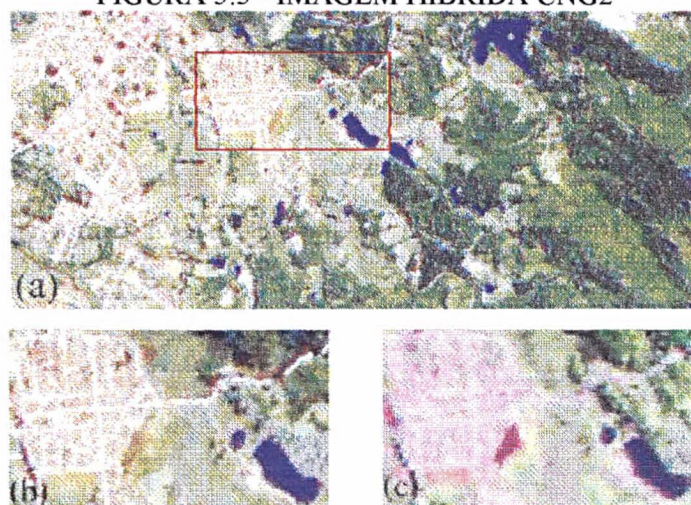
Das imagens híbridas, as resultantes da fusão por Cor Normalizada (FIGURA 5.2) mostraram-se indicadas para interpretação visual devido a um alto nível de variação tonal. Além disso, a cor normalizada apresentou uma redução do efeito da sombra, possivelmente por trabalhar com a razão entre as imagens, operação aritmética que minimiza esse efeito, pois, assim como ocorre com índices de vegetação pela diferença normalizada (NDVI, sigla correspondente às palavras em inglês), as diferenças entre os baixos valores de níveis de cinza são realçadas.

As imagens geradas por Cor Normalizada (FIGURAS 5.2 e 5.3) foram consideradas as mais próximas na reprodução das cores da imagem original TM. Ao comparar as imagens híbridas dos grupos G1 e G2, foi possível observar uma maior atenuação da região de sombra, na imagem gerada com as bandas do grupo G1, provavelmente devido à normalização dos níveis de cinza, inerente àquele método de fusão. Entretanto a fusão do grupo G2 possibilitou uma maior discriminação visual entre o solo exposto e a região urbanizada (FIGURA 5.3), do que a discriminação



verificada, para as mesmas feições, em relação ao grupo G1 (bandas B'5, B'4 e B'3).

FIGURA 5.3 - IMAGEM HÍBRIDA CNG2



Pode-se comparar a imagem resultante da fusão das bandas 7, 5 e 3 do sensor TM e a banda pancromática do SPOT com as respectivas bandas originais do Landsat-5 TM, pela área em destaque no retângulo vermelho e verificar o ganho no detalhamento que essa imagem oferece (FIGURA 5.3). Entre as imagens híbridas geradas por esse método, aquela em que utilizaram-se as bandas 5, 4 e 3 do sensor TM ofereceu uma melhor interpretabilidade das feições, além de apresentar uma maior semelhança espectral com os dados originais, como será visto a seguir na análise das matrizes de correlação.

#### 5.2.1.2 Análise da correlação

É interessante perceber, pela análise da TABELA 5.6, que a correlação entre as bandas SPOT pancromática e as bandas híbridas, oriundas da fusão por transformação Cor Normalizada, tornou-se mais alta depois da fusão. Isto se deve à participação da banda pancromática no processo de fusão, visto que ocorre uma “mistura espectral” dos dados. É fácil perceber o aumento da correlação ao se comparar os dados da TABELA 5.6 com os valores encontrados na TABELA 5.4.

TABELA 5.6 – CORRELAÇÃO ENTRE A BANDA PANCROMÁTICA E AS BANDAS HÍBRIDAS DOS GRUPOS CNG1 E CNG2

Bandas	B'5	B'4	B'3	Bandas	B'7	B'5	B'3
Pan	0,925	0,736	0,786	Pan	0,927	0,881	0,704

Ao se observar os números da TABELA 5.7, pode-se notar a semelhanças e diferenças com os valores da matriz de correlação das bandas originais nas TABELAS 5.3 e 5.5, apresentadas anteriormente.

TABELA 5.7 – CORRELAÇÃO ENTRE AS BANDAS DE CNG1 E CNG2

CNG1				CNG2			
Bandas	B'5	B'4	B'3	Bandas	B'7	B'5	B'3
B'5	1,000	0,505	0,703	B'7	1,000	0,781	0,528
B'4	0,505	1,000	0,314	B'5	0,781	1,000	0,371
B'3	0,703	0,314	1,000	B'3	0,528	0,371	1,000

A mudança nos valores da correlação indica que houve alteração dos dados originais após a fusão pelo método da cor normalizada. De forma geral, o valor da correlação diminuiu, assim o poder discriminatório das imagens originais pode ter sido mantido ou melhorado. É interessante observar que para o grupo G2 os valores da correlação caíram, enquanto que no grupo G1 houve aumento da correlação para as bandas 3 e 4, e decréscimo para a banda 5 (TABELAS 5.3, 5.4 e 5.7). As diferenças entre as correlações entre os dados originais e híbridos (CNG1 e CNG2) são apresentados na TABELA 5.8.

TABELA 5.8 – DIFERENÇAS ENTRE AS CORRELAÇÕES DAS BANDAS DE CNG1 E CNG2 E OS DAS BANDAS ORIGINAIS

CNG1				
Bandas		B'5	B'4	B'3
Originais	B5	0,000	0,024	0,109
	B4	0,024	0,000	0,095
	B3	0,109	0,095	0,000

CNG2				
Bandas		B'7	B'5	B'3
Originais	B7	0,000	0,137	0,347
	B5	0,137	0,000	0,441
	B3	0,347	0,441	0,000

Ao avaliar os dados da TABELA 5.8, pode-se afirmar que houve uma redução mais acentuada para valores originais altos (grupo G2), enquanto os demais valores (grupo G1) foram mantidos baixos após a fusão por Cor Normalizada. Vale ressaltar

que os valores referentes às diferenças apresentadas na tabela 5.8, estão em módulo, evitando-se trabalhar com números negativos.

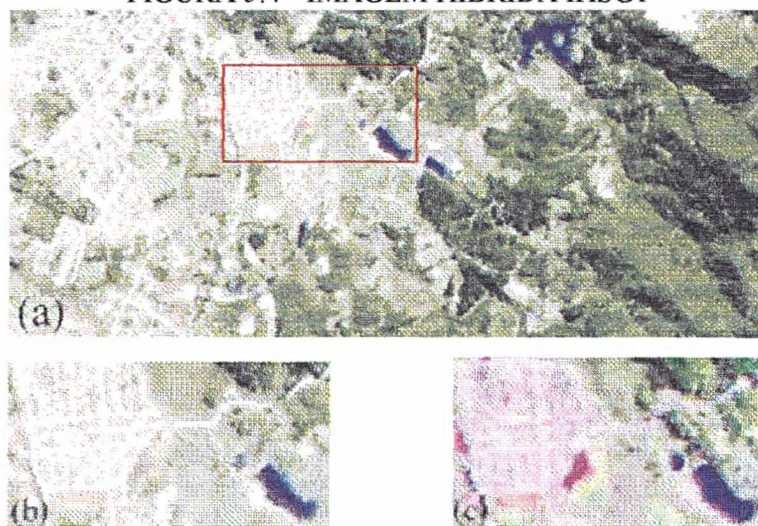
### 5.2.2 Fusão pela Transformação IHS

Após obtenção das imagens híbridas pela fusão por transformação IHS, conforme o processo apresentado nas seções 3.4.1 e 4.3.3.1 dos capítulos anteriores, foi efetuada a avaliação das imagens resultantes quanto à sua potencialidade para a interpretação visual.

#### 5.2.2.1 Interpretação das imagens

As imagens híbridas, obtidas pela transformação IHS, mostraram uma diferenciação entre a vegetação de gramíneas e arbórea, com mesma eficiência que destacou os espaços urbanos e de solo exposto (FIGURAS 5.4 e 5.5). Pode-se compará-las aos dados originais, observando-se a região destacada em vermelho.

FIGURA 5.4 - IMAGEM HÍBRIDA IHSG1



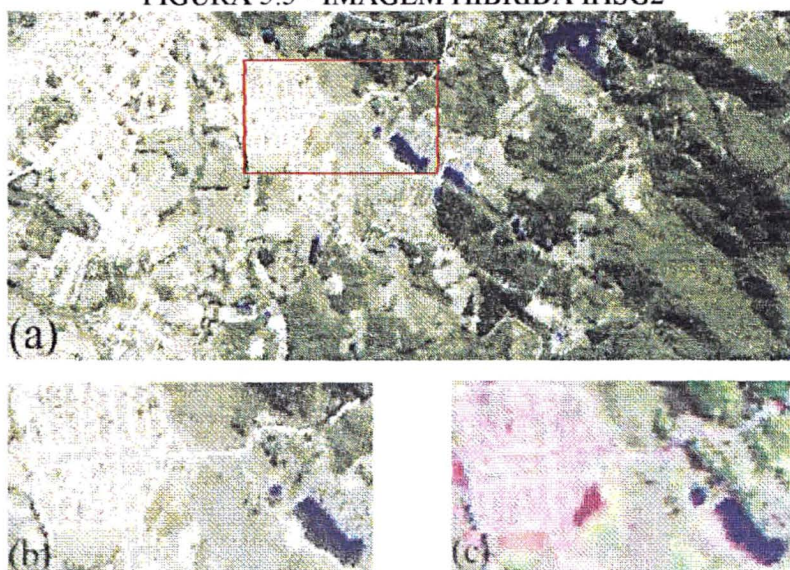
Comparando-se visualmente a imagem IHSG1 (FIGURA 5.4) com a imagem IHSG2 (FIGURA 5.5), verificou-se que foi mais fácil interpretar a IHSG1 do que a IHSG2, porque esta última revelou uma maior suavidade nos tons por toda a imagem.



Entretanto, em ambas as imagens, pode-se se ter uma maior discriminação entre a vegetação e as áreas de solo exposto e a urbana, do que as composições originais. Das duas imagens, IHSG2, na qual utilizaram-se as bandas 7, 5, e 3 TM, destacou melhor os corpos d'água do que IHSG1 (bandas 5, 4 e 3 TM).

Feições como a vegetação arbórea, apresentaram um certo decréscimo em sua visualização em comparação com as imagens originais do Landsat-5 TM (bandas 5, 4 e 3), isso variou com área sombreada e iluminação do relevo, que a feição ocupa na imagem. Por exemplo, a vegetação que ocorre numa área de relevo mais acidentado, sofreu mais com a interferência sombra provocada pela topografia, consequentemente a visualização dessa feição mostrou-se escurecida nas imagens híbridas geradas pelo método fusão IHS, no qual o efeito da sombra não foi minimizado (CHAVEZ, 1986). Embora a imagem híbrida do G2 tenha apresentado menos regiões sombreadas do que a processada com o grupo G1.

FIGURA 5.5 - IMAGEM HÍBRIDA IHSG2



Feições como Várzea e Floresta ciliar foram beneficiadas com o método IHS. Entretanto, em áreas com vegetação densa houve redução nos valores dos níveis de cinza, tornando-se mais escuras. Por outro lado, em regiões urbanizadas e solo exposto ocorreu uma melhora na visualização. Esses fatos concordam com os resultados apresentados em CHAVEZ et al. (1990).

### 5.2.2.2 Análise da correlação

Durante o processo de fusão das imagens, observou-se que para o grupo de imagem IHSG1 (proveniente das bandas 5, 4, e 3 do sensor TM) a componente gerada I (Intensidade) obteve uma correlação de 0,749 com a banda pancromática SPOT (TABELA 5.9). Quando não ocorre alta correlação, a banda pancromática pode sofrer manipulação do contraste para tornar-se semelhante à componente I, o que não deve ser confundido com o aumento de correlação entre a componente Intensidade e a banda Pancromática.

TABELA 5.9 - CORRELAÇÃO DA BANDA PANCROMÁTICA E AS COMPONENTES DA IMAGEM IHSG1

Banda	I	H	S
Pan	0,749	0,476	0,389

TABELA 5.10 - CORRELAÇÃO ENTRE A BANDA PANCROMÁTICA E AS COMPONENTES DA IMAGEM IHSG2

Banda	I	H	S
Pan	0,751	-0,311	-0,665

Observando-se a TABELA 5.10, é possível notar que: com o grupo G2 (bandas 7, 5 e 3) a correlação entre a imagem pancromática e a componente intensidade foi de 0,751, isso ocorreu devido à semelhança espectral entre a banda pancromática e componente intensidade I calculada para o grupo G2. Esta explicação também é válida para o grupo G1 (banda 5, 4 e 3). Vale lembrar que uma alta correlação entre a banda pancromática e a componente I é um fato fundamental para o bom desempenho do método (CLICHE et al., 1985).

É importante salientar que os valores apresentados nas TABELAS 5.9 e 5.10 referem-se a componentes geradas durante o processo de fusão por IHS, antes de transformá-las de volta para o espaço RGB, e não ao resultado final da fusão.

TABELA 5.11 – CORRELAÇÃO ENTRE AS BANDAS HÍBRIDAS IHSG1E IHSG2

IHSG1				IHSG2			
Bandas	B'5	B'4	B'3	Bandas	B'7	B'5	B'3
B'5	1,000	0,917	0,865	B'7	1,000	0,912	0,950
B'4	0,917	1,000	0,746	B'5	0,912	1,000	0,814
B'3	0,865	0,746	1,000	B'3	0,950	0,814	1,000

Os dados da TABELA 5-11 revelaram que as imagens originais 5, 4, e 3 TM, após fundidas pela transformação IHS, tornaram-se mais correlacionadas entre si. Este fato pode se refletir numa dificuldade posteriormente, quando forem discriminadas as classes. Mas também pode indicar uma considerável alteração dos valores espectrais originais para o grupo G1. Verificou-se que as bandas do grupo G2 (7, 5 e 3 TM) apresentaram um aumento nos valores da correlação após a fusão.

TABELA 5.12 – DIFERENÇAS ENTRE AS CORRELAÇÕES DAS BANDAS DE IHSG1 E IHS2 E AS DAS BANDAS ORIGINAIS

IHSG1					IHSG2				
Bandas		B'5	B'4	B'3	Bandas		B'7	B'5	B'3
Originais	B5	0,000	0,436	0,053	Originais	B7	0,000	0,006	0,075
	B4	0,436	0,000	0,527		B5	0,006	0,000	0,002
	B3	0,053	0,527	0,000		B3	0,075	0,002	0,000

Pela TABELA 5.12 pode-se verificar as diferenças da correlação entre os dados originais (TABELA 5.3 e 5.5) e os obtidos após a fusão por IHS (TABELA 5.11). Para o grupo G2, verifica-se que os baixos valores das diferenças indicam que a correlação das bandas originais manteve-se na mesma ordem de grandeza. Baseado neste fato, pode-se dizer que a transformação IHS não alterou significativamente as informações espectrais do grupos G2 após a fusão. Pode-se dizer que a preservação dos dados originais ocorreu apenas para o grupo que apresentou maior correlação entre as bandas originais (TABELA 5.5).

### 5.2.3 Fusão por Componente Principal

Após obtenção das imagens híbridas pela fusão por Componente Principal,



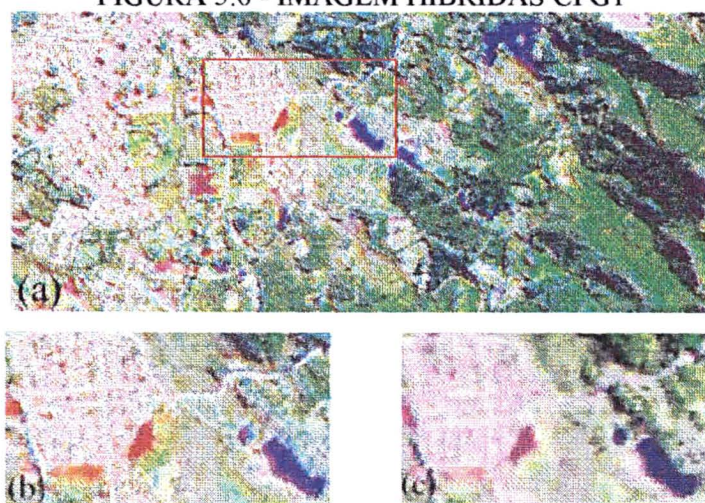
conforme o processo apresentado nas seções 3.4.2 e 4.3.3.2 dos capítulos anteriores, foi efetuada a avaliação das imagens resultantes quanto à sua potencialidade para a interpretação visual.

#### 5.2.3.1 Interpretação das imagens

As imagens obtidas da fusão por Componente principal, em geral, mostraram uma grande variação tonal por toda a imagem, isto se deve ao aumento do realce inerente à transformação entre o espaço de cor RGB e o espaço da Componente Principal, ambos envolvidos no método. Ao se fazer composições com as bandas dos grupos G1, G2 e G3, foi possível destacar feições como em nenhuma outra imagem gerada por outro método de fusão.

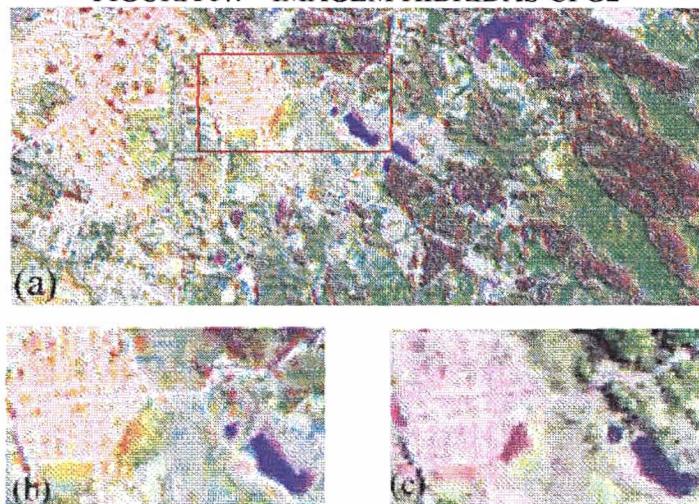
A discriminação visual foi alta, mesmo quando usaram-se três bandas (FIGURAS 5.6 e 5.7), e muito mais acentuada quando foram usadas quatro bandas (FIGURA 5.8), segundo CHAVEZ e KWARTENG (1989), uma grande variação tonal causa uma confusão de cores que, por sua vez, pode ser vista como uma desvantagem, pois dificulta a interpretação visual. Entretanto observou-se justamente o oposto: a variação tonal mostrou-se uma aliada na interpretação de feições, sendo esta superior aos resultados encontrados com métodos apresentados anteriormente.

FIGURA 5.6 - IMAGEM HÍBRIDAS CPG1



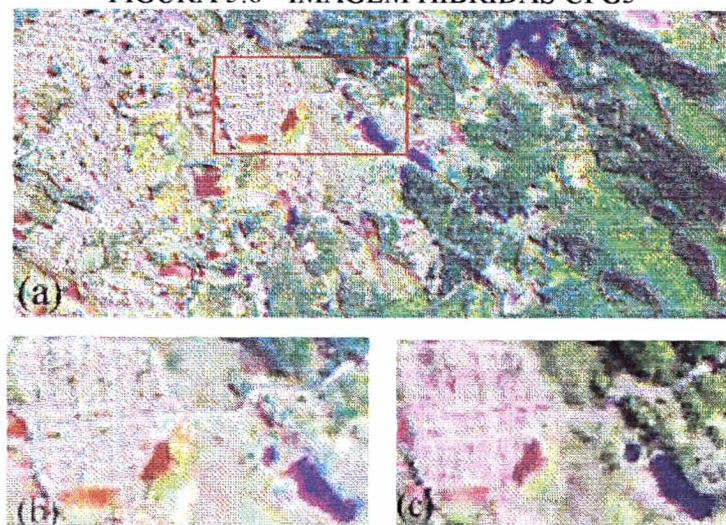
Pode-se comparar o ganho espectral e espacial, que essas imagem tiveram em relação aos dados originais Landsat-5 TM, ao observar a área destacada em vermelho (FIGURAS 5.6 e 5.7).

FIGURA 5.7 - IMAGEM HÍBRIDAS CPG2



Pode-se destacar a resultante da fusão por principais componentes na qual foram usadas quatro bandas do Landsat TM (FIGURA 5.8), como uma das mais adequadas visualmente para a interpretação, pois mostrava grande variação tonal para todas as feições. Por esse motivo foi escolhida para a verificação da classificação em campo, além de auxiliar na classificação digital, quando da determinação das áreas de treinamento.

FIGURA 5.8 - IMAGEM HÍBRIDAS CPG3





Ao comparar a imagem original e as imagens híbridas geradas pelos métodos de fusão, foi possível perceber que houve um aumento considerável no nível de detalhamento nas resultantes das fusões, destacando-se entre essas, as imagens obtidas por Componente Principal para o grupo G1 e G3, as quais apresentaram uma ampla variação na tonalidade das feições e de brilho. Vale salientar que tais imagens possibilitaram composições que destacavam tipos de vegetação, o que não foi possível com as imagens geradas pelos outros métodos.

### 5.2.3.2 Análise da correlação

Observou-se para este método as correlações entre a primeira componente e a banda pancromática, essa é a principal exigência dos métodos de substituição de componente. De acordo com as TABELAS 5.13, 5.14 e 5.15, pode dizer que a condição primária para o bom desempenho do método de fusão por componente principal foi satisfeita.

TABELA 5.13 - CORRELAÇÃO DA PRIMEIRA COMPONENTE DA IMAGEM HÍBRIDA CPG1 COM A SPOT PANCROMÁTICA

Bandas	CP1	CP2	CP3
PAN	0,673	-0,431	-0,334

TABELA 5.14 – CORRELAÇÃO DA PRIMEIRA COMPONENTE DA IMAGEM HÍBRIDA CPG2 COM A SPOT PANCROMÁTICA

Bandas	CP1	CP2	CP3
PAN	0,790	-0,212	-0,263

TABELA 5.15 - CORRELAÇÃO DA PRIMEIRA COMPONENTE DA IMAGEM HÍBRIDA CPG3 COM A SPOT PANCROMÁTICA

Bandas	CP1	CP2	CP3	CP4
PAN	0,755	-0,249	0,278	0,184

TABELA 5.16 – MATRIZES DE CORRELAÇÃO ENTRE AS BANDAS DAS IMAGENS HÍBRIDAS CPG1 E CPG2

CPG1				CPG2			
Bandas	B'5	B'4	B'3	Bandas	B'7	B'5	B'3
B'5	1,000	0,265	0,461	B'7	1,000	0,324	0,396
B'4	0,265	1,000	0,379	B'5	0,324	1,000	0,410
B'3	0,461	0,379	1,000	B'3	0,396	0,410	1,000

Pela análise da TABELA 5.16, percebe-se que a fusão pelo método da Componente Principal manteve uma baixa correlação entre as bandas, como já foi dito, pode ser um fator positivo na discriminação das classes. Comparando-se os valores da TABELA 5.16 com os das TABELAS 5.3 e 5.5, nota-se que houve uma diminuição nos valores da correlação em relação às bandas originais. Este fato se refletiu numa melhora da acurácia da classificação das imagens híbridas resultante da fusão pela componente principal, como será visto mais adiante.

TABELA 5.17 – CORRELAÇÃO ENTRE AS BANDAS HÍBRIDAS DE CPG3

Banda	B'7	B'5	B'4	B'3
B'7	1,000	0,336	0,135	0,362
B'5	0,336	1,000	0,148	0,400
B'4	0,135	0,148	1,000	0,233
B'3	0,362	0,400	0,233	1,000

É possível observar pela TABELA 5-17, que houve uma redução nos valores das correlações do grupo G3, o que provavelmente levou ao resultado satisfatório na classificação digital das imagens híbridas resultantes das bandas 7, 5, 4 e 3 do sensor TM por Componente Principal. O fato de poder incorporar mais de três bandas (CPG3) no processo de fusão, também pode ser visto como um fator positivo na discriminação das classes.

TABELA 5.18 – DIFERENÇAS ENTRE AS CORRELAÇÕES DAS BANDAS DE CPG1 E CPG2 E AS DAS BANDAS ORIGINAIS

		CPG1					CPG2		
Bandas		B'5	B'4	B'3	Bandas		B'7	B'5	B'3
Originais	B5	0,000	0,216	0,351	Originais	B7	0,000	0,594	0,479
	B4	0,216	0,000	0,160		B5	0,594	0,000	0,402
	B3	0,351	0,160	0,000		B3	0,479	0,402	0,000

Conforme os valores apresentados nas TABELAS 5.18 e 5.19, as diferenças entre as correlações dos dados originais (TABELAS 5.3 e 5.5) e as imagens híbridas indicam uma alteração dos dados originais após a fusão.

Comparada com os métodos C.N e transformação IHS, pode-se afirmar que a

fusão por Componente Principal para o grupo G2 e G3 apresentou a maior distorção dos dados originais TM. Apenas com o grupo G1 a alteração não se deu de forma acentuada. Entretanto esse método proporcionou banda híbridas que apresentaram os mais baixos valores de correlação entre si.

TABELA 5.19 – DIFERENÇAS ENTRE AS CORRELAÇÕES DAS BANDAS DE CPG3 E DAS BANDAS ORIGINAIS

		CPG3			
Bandas		B'5	B'4	B'3	B'7
Originais	B5	0,000	0,582	0,128	0,513
	B4	0,582	0,000	0,333	0,412
	B3	0,128	0,333	0,000	0,014
	B7	0,513	0,412	0,014	0,000

### 5.3 CLASSIFICAÇÃO DAS IMAGENS

As imagens híbridas e original foram classificadas pelo método de máxima probabilidade, sendo definidas sete classes. Nas seções subsequentes apresentam-se os resultados e comentários inerentes à metodologia utilizada na classificação.

#### 5.3.1 Análise da Separabilidade entre as Classes

Conforme foi exposto no Capítulo 4, nas seções que tratam da definição das classes e verificação da classificação (4.3.6.3 e 4.3.6.4), os 62 polígonos, definidos como áreas de treinamento, foram analisados a fim de verificar se seguiam uma distribuição normal, em caso negativo, excluiu-se o polígono da classificação. Isto foi feito para não comprometer as categorias contempladas, em outras palavras, a retirada dos polígonos, que não possuíam uma distribuição normal, não comprometeu o processo de classificação, visto que para cada classe foram determinadas regiões de interesse em abundância. É importante lembrar que nessa fase, em termos de processamento, cada polígono foi considerado como uma classe independente, isto facilitou tanto na identificação daquelas amostras eventualmente mal definidas como,

posteriormente, na análise da separabilidade entre as classes.

Quanto à confusão de uma classe em relação a outras classes, cada polígono foi confrontado através da avaliação das matrizes de contingência. Os polígonos de mesma classe foram agrupados após a análise dessas matrizes, totalizando-se em sete categorias no final:

- 1) Água;
- 2) Solo Exposto;
- 3) Urbana;
- 4) Vegetação de Várzea;
- 5) Floresta Ombrófila Mista alterada;
- 6) Floresta Ciliar e
- 7) Reflorestamento.

Com o propósito de analisar a separabilidade entre as sete classes, calculou-se a matriz de contingência, para qual as áreas de treinamento são consideradas como verdadeiras em campo e comparadas com a imagem classificada, tendo assim a quantidade de *pixel* (também pode ser expressa em percentagem) de uma determinada classe, que foi confundida com os *pixels* de outra classe. Pode-se conferir quais classes foram mais confusas, conforme os APÊNDICES 3, 4 e 5. Dessa maneira procedeu-se com a exclusão ou agrupamento dos polígonos que representavam cada classe. Entre as classes agrupadas estão as de mesmo nome e aquelas que se encontravam sob sombra, sendo que a única classe excluída do processo de classificação, foi aquela nomeada de “reflorestamento sob sombra” (nos APÊNDICES 3, 4 e 5 esta classe foi abreviada por “ReflorS”). A decisão de excluí-la foi baseada na análise das matrizes de erro que revelaram a confusão dos seus *pixels* com os de outras classes de vegetação, tratando-se de uma classe não existente, visto que o relevo da área do reflorestamento não apresenta grande amplitude hipsométrica.

A separabilidade das classes foi feita pela análise de acurácia do produtor, na qual as percentagens de cada classe é o resultado da divisão entre o número dos *pixels* aferidos da amostra de campo (numerador) pelo número de *pixels* usados pelo classificador (denominador). Esses cálculos foram baseados nas matrizes de erros que se encontram nos APÊNDICES 6, 7 e 8, a partir das quais criou-se a TABELA 5.20 para resumir e facilitar o entendimento geral da separabilidade entre as classes de

acordo com cada imagem classificada. Na próxima seção (5.3.2), discute-se de que forma as amostras de campo foram coletadas e o procedimento para a aferição da classificação digital das imagens híbridas e original.

TABELA 5.20 – SEPARABILIDADE DAS CLASSES NAS IMAGENS CLASSIFICADAS

Classes (%)	IMAGENS							
	ORIGINAL	CNG1	CNG2	IHSG1	IHSG2	CPG1	CPG2	CPG3
AG	100,00	98,28	91,25	78,75	72,50	100,00	83,75	90,73
FOM	79,69	79,51	83,13	90,31	90,63	96,88	85,00	81,11
REF	91,25	93,39	83,75	93,75	73,75	88,75	90,00	100,00
SOL	23,05	87,60	71,88	39,45	39,84	56,25	79,30	83,54
URB	40,83	82,41	70,00	85,42	87,92	74,17	54,17	78,18
VAR	89,84	81,14	87,89	92,97	88,67	61,72	83,20	87,90
FLC	83,59	64,18	73,83	83,98	79,30	89,45	78,52	86,26

AG-Água, FOM-Floresta Ombrófila Mista; REF-Reflorestamento; SOL-Solo Exposto; URB-Área Urbana; VAR-Várzeas e capões; FLC-Floresta ciliar.

A TABELA 5.20 permite analisar a separabilidade e a acurácia para as classes estudadas. Resumidamente pode-se afirmar que a classe água foi melhor discriminada nas imagens classificadas Original, CPG1 e CNG1. O solo exposto e as áreas urbanizadas, que são naturalmente classes de difícil separabilidade entre si, apresentaram um ganho na discriminação quando se usaram as imagens híbridas CNG1, CNG2 e CPG3, ao passo que na imagem classificada a partir da Original essas classes apresentaram os índices mais baixos de separabilidade. Esta afirmação concorda com os resultados obtidos em PADILHA (1995). É interessante notar que nas imagens classificadas IHSG1, IHSG2, CPG1 houve um baixo valor de discriminação para o solo exposto, embora a área urbana tenha apresentado valores acima de 70% de acurácia. Na imagem classificada CPG2 ocorreu o inverso: a classe URB apresentou valores mais baixos do que os do solo exposto. A partir desses resultados pode-se afirmar dois fatos a respeito dos métodos de fusão por substituição de componente:

- primeiro, para as imagens híbridas resultantes da fusão por transformação IHS,

verificou-se que a separabilidade das classes URB e SOL independe das bandas utilizadas, o que pode indicar que o método oferece uma baixa capacidade de contrastar e discriminar regiões de *pixels* heterogêneos (classe URB) dos *pixels* com altos valores de nível de cinza ( classe SOL).

- Em segundo lugar, percebe-se que nas imagens classificadas a partir das imagens resultantes da fusão por Componente Principal, houve uma influência das bandas utilizadas, verificou-se portanto que o grupo G1 (bandas 5, 4 e 3) favoreceu a classe URB e o grupo G2 (bandas 7, 5, e 3) favoreceu a classe SOL, havendo um aumento no índice de acurácia de ambas as classes somente quando foram usadas quatro bandas (grupo G3), o que pode indicar a importância da inclusão da banda 4 para processamento da primeira componente principal, em cuja estatística baseia-se a quantidade do realce a ser aplicado na imagem SPOT pancromática durante o processo de fusão.

Ainda em relação às classes URB e SOL, verificou-se que a fusão por Cor Normalizada proporcionou imagens híbridas que, independentemente da quantidade de bandas utilizadas, discriminaram as áreas de *pixels* heterogêneos da classe solo exposto que também apresenta valores de reflectância próximos aos da classe URB. Isto se deve à valiosa característica do método *pixel a pixel* que é o aumento no contraste de áreas que apresentam, entre si, pequena diferença nos valores dos níveis de cinza.

Em geral, as classes que se referem à vegetação tiveram maiores valores de separabilidade nas imagens híbridas obtidas por Componente Principal e por transformação IHS. A classe floresta Ombrófila Mista (FOM) apresentou índice de separabilidade mais alto nas imagens classificadas CPG1, IHSG1 e IHSG2. As áreas de reflorestamento de eucalipto foram melhor discriminadas nas imagens classificadas CPG3, IHSG1 e CNG1, observando-se que a diferença de valores entre as duas últimas foi de 0,36 pontos percentuais. A classe VAR, que inclui as áreas de várzeas e capões, apresentou maior separabilidade nas imagens IHSG1 e Original, e a classe FLC (floresta Ciliar) foi melhor discriminada nas imagens classificadas a partir da Original, CPG1, CPG3 e IHSG1. É interessante observar que as imagens CPG1, CPG3

e IHSG1 apresentaram os valores mais baixos na acurácia da classe água (AG), podendo-se relacionar este fato à provável confusão dessa classe com as duas classes de vegetação, VAR e FLC, as quais ocorrem sobre solo úmido e que apresentaram os valores mais altos na acurácia para aquela três imagens. Isto pode ser explicado pelo fato de que os métodos de fusão baseados na substituição de componente, nos quais se incluem a transformação IHS e a fusão por componente principal, fornecem imagens híbridas que contratam melhor as áreas úmidas cobertas por vegetação do que o fazem as imagem híbridas resultantes da fusão por Cor Normalizada. Além disso, há dois fatos dignos de nota: a transformação IHS e o grupo das bandas 5, 4 e 3 propiciaram uma maior discriminação da tipologia vegetal, o que concorda com o exposto na literatura e explica os valores do índice de acurácia alcançados pela imagem IHSG1 em relação às classes de vegetação associadas com o fator umidade do solo. Conseqüentemente, pode-se dizer que a componente de Intensidade (I) obtida para o grupo 5, 4 e 3 possuiu um poder discriminatório maior do que o da primeira componente principal obtido para o mesmo grupo.

### 5.3.2 Análise da Classificação Digital

A verificação da classificação digital foi realizada de forma sistemática: foi elaborada uma rede na qual usou-se um espaçamento de 1,5 km x 1,5 km entre as linhas horizontais e verticais, coletando-se um total de 98 amostras (número maior do que o número mínimo citado na expressão (5) localizada na seção 4.3.6.4 no capítulo 4). Definiu-se cada amostra formando um quadrado de 4 x 4 *pixels* (equivalente a 40X40 m, nas imagens híbridas e a 120 x 120 m na imagem original TM) e localizando-as nos cruzamentos das linhas da rede. Ao se definir cada amostra, obedeceu-se o seguinte critério: levou-se em consideração o fato de o cruzamento das linhas coincidir com o limite entre duas (ou mais) classes em que seja difícil o enquadramento da amostra, então optou-se por deslocá-la para a área de tipologia de maior frequência. Continuou-se com o processo até que todas as classes fossem contempladas no processo de aferição. O número de amostra variou de acordo com o

tamanho da área de cobertura de cada classe. Ficando o total de 98 amostras distribuído assim: Água com 10 amostras; Área urbana com 15; solo exposto com 16; várzea com 16; Floresta ciliar com 16; Reflorestamento com 5 e Floresta ombrófila mista alterada com 20 amostras.

Segundo os resultados das análises, houve a necessidade de agrupar as classes ou suprimir, como no caso do reflorestamento sob sombra, que sempre se confundia com outros tipos de vegetação sobre área de sombra, verificando-se como uma classe inexistente, o mesmo ocorreu para a classe “Mata remanescente”, que pôde ser compreendida como pertencente à classe “Floresta Ombrófila Mista”. No caso de florestas e sua respectivas áreas sobre sombra, foi preferível agrupar classes. As classes finais foram nomeadas conforme os APÊNDICES 6, 7 e 8.

A acurácia da classificação foi calculada pelo coeficiente *Tau*, que segundo MA (1995) mostrou resultados tão bons quanto o coeficiente *Kappa*. Além disso, o *Tau* é recomendado por ser mais fácil de calcular e por oferecer a possibilidade de considerar se a classificação foi realizada com probabilidade a priori ou com probabilidades iguais, esta última se insere neste trabalho.

Em resumo, os resultados das análise da acurácia da classificação podem ser avaliados pelos valores do coeficiente de concordância *Tau* na TABELA 5.21. Percebe-se que o grupo de imagens G3 (bandas 7, 5, 4 e 3 TM) fundido pelo método da Componente Principal, obteve o índice mais alto na acurácia da classificação. O fato deste grupo contar com quatro bandas, pode ter contribuído para o alto desempenho na classificação da cena.

TABELA 5.21 – ACURÁCIA DAS IMAGENS CLASSIFICADAS

ÍNDICE DE ACURÁCIA	IMAGENS CLASSIFICADAS							
	ORIGINAIS	CNG1	IHSG1	CPG1	CNG2	IHSG2	CPG2	CPG3
Coeficiente <i>Tau</i> (%)	64,36	80,67	76,26	76,34	75,96	73,21	74,48	82,83
Diferença com a original	0,00	16,31	11,90	11,98	11,60	8,85	10,12	18,47

CN: fusão por Cor Normalizada

IHS fusão por transformação IHS

CP fusão por Componente Principal

G1 bandas 5, 4, e 3 TM

G2 bandas 7, 5, e 3 TM

G3 bandas 7, 5, 4, e 3 TM



Percebe-se pela tabela 5.21 que a imagem classificada a partir dos dados originais TM obteve um índice de acurácia no mínimo 8,85 pontos percentuais abaixo do menor valor alcançado pelas imagens classificadas a partir do resultados das fusões. Ao comparar-se com o índice de acurácia obtido com o grupo G3, verifica-se que a diferença entre este e o valor alcançado com a classificação do dados originais aumenta em 18,47 pontos percentuais.

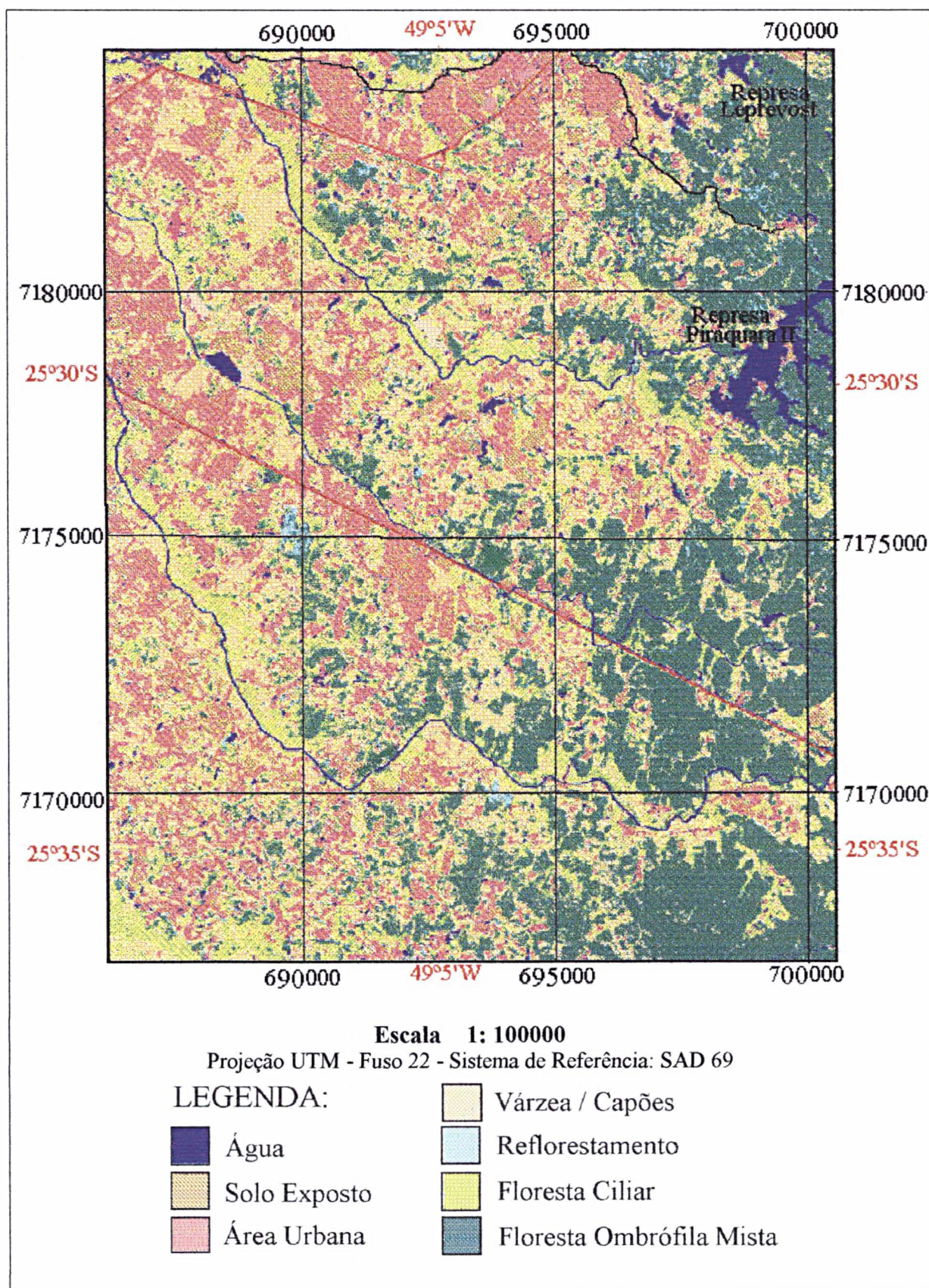
É interessante notar que o grupo G1, em todos os métodos de fusão, apresentou índices de acurácia mais altos do que os alcançados pelo grupo G2. Este fato pode estar relacionado com a correlação entre as bandas de um mesmo grupo de imagens. Pois o grupo G1, formado pelas banda 5, 4 e 3, mostrava baixos valores de correlação entre suas bandas. Segundo TOWNSHEND (1984), por se tratarem de bandas das regiões infravermelho médio, infravermelho próximo e do visível, contribuem para um aumento na discriminação das classes. Isto concorda também com HOLER e AHERN (1986) e CHAVEZ (1992) que afirmam haver relação entre baixa correlação das bandas do sensor TM com a discriminação de classes, principalmente as que se referem à vegetação.

Além disso, este resultado concorda com o pressuposto por CLICHE et al. (1985) que aponta a alta correlação entre as bandas do sensor TM e a SPOT pancromática com fundamental para o bom desempenho do método de fusão por IHS e Componente Principal, justificando que um algoritmo pode se desempenhar melhor que outro dependendo de quais bandas da região do espectro se trabalha.

Os resultados encontrados na classificação da imagens obtidas das fusões das bandas do grupo G2, que apresentaram maior correlação entre suas bandas do que o grupo G1, se opõem ao que afirma MUNECHIKA et al. (1993), segundo os quais, uma forte correlação entres os dados TM e SPOT pancromática é o principal fator para se obter um bom resultado na fusão e conseqüentemente na classificação.

A seguir a FIGURA 5.9 traz a imagem classificada a partir da imagem híbrida gerada por Componente Principal (bandas 7, 5, 4 e 3 TM e a banda SPOT pancromática), que alcançou os índices mais altos de acurácia. Sobre esta imagem classificada foram digitalizados ao principais rios e rodovias da área de estudo.

FIGURA 5.9 – IMAGEM CLASSIFICADA A PARTIR DA IMAGEM HÍBRIDA OBTIDA PELA FUSÃO POR COMPONENTE PRINCIPAL



## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A realização deste trabalho permitiu fundir imagens do Landsat-5 TM e SPOT pancromática e investigar as contribuições para uma metodologia aplicada ao mapeamento do uso da terra.

De acordo com os objetivos descritos neste trabalho, chegou-se às seguintes conclusões:

- A) as imagens híbridas resultantes dos métodos de fusão por Cor Normalizada, transformação IHS e Componente Principal, proporcionaram uma maior facilidade de interpretação visual do que a imagem original Landsat-5 TM. Verificou-se portanto um ganho na resolução espacial dessas imagens, contribuindo para o mapeamento do uso do solo na identificação dos limites entre as feições e na discriminação de alvos de interesse. Vale destacar que as imagens híbridas resultantes da fusão por Cor Normalizada e por Componente Principal ofereceram a melhor interpretação;
- B) as imagens resultantes revelaram-se mais adequadas para a produção de cartas – imagem do que a imagem original. Isto é decorrente do bom desempenho dos métodos de fusão. Deve-se considerar que as escalas das cartas sejam menores que 1:25.000, dependendo do nível de detalhamento desejado pelo usuário;
- C) uma maior discriminação entre as classes foi observada na imagens híbridas, o que se verifica como uma consequência do aumento da resolução espacial em facilitar a identificação das feições para a regra de classificação por máxima verossimilhança;
- D) a separabilidade da feição solo exposto das demais feições foi acentuada nas imagens geradas pelos métodos Cor Normalizada e Componente Principal. Sendo esses métodos mais indicados quando for interessante mapear uma região que contenha solo exposto.
- E) quanto à acurácia das imagens classificadas, foi possível notar que as bandas 5, 4 e 3 apresentavam menor correlação do que as bandas 7, 5 e 3, ambos os grupos na imagem original TM. O que indica que a baixa correlação entre as bandas foi o



fator mais importante para a classificação e que não comprometeu o desempenho dos métodos de fusão, pois as imagens obtidas com as bandas pouco correlacionadas (grupo G1) acarretaram ganho na classificação dos produtos híbridos;

- F) é interessante salientar que, pela fusão por transformação IHS, foram obtidas imagens híbridas altamente correlacionadas, como também verificou-se uma alta correlação entre a componente I (dos grupos G1 e G2) e a banda pancromática. Na avaliação das imagens classificadas, o índice de concordância *Tau* apresentou uma diferença de 3 pontos percentuais entre a imagem classificada do grupo G1 (bandas 5, 4 e 3) e a do grupo G2 (bandas 7, 5 e 3);
- G) as classes relativas à cobertura vegetal obtiveram maior separabilidade nas imagens híbridas. Entretanto, as classes Água, Várzea/capões e Floresta ciliar também obtiveram alta separabilidade na imagem classificada a partir do grupo original (bandas 5, 4 e 3 TM);
- H) o fato de permitir a utilização de mais do que três bandas no processo de fusão favoreceu às imagens híbridas geradas por Componente Principal, pelo qual foi possível fundir a imagem SPOT pancromática com as bandas 7, 5, 4, e 3 TM. A imagem resultante desta fusão não só alcançou o índice de acurácia mais alto dentre as imagens classificadas, mas também revelou-se entre as imagens mais adequadas à interpretação;

Em vista dessas conclusões, é sabido que o assunto não se esgota com esta pesquisa, fazem-se a seguir algumas considerações e recomendações.

Interpretar visualmente uma imagem pode ser uma tarefa complexa e que envolve subjetividade, neste trabalho as imagens foram avaliadas apenas pelo autor, recomenda-se portanto que em trabalhos semelhantes a este, que eventualmente venham a ser realizados, as imagens possam ser interpretadas por um mais de pessoa.

Esse trabalho abre espaço para discussões e aperfeiçoamento das técnicas envolvidas, visto à tendência de se ter imagens de satélites com resolução espacial

cada vez maiores. Além disso o trabalho partiu do pressuposto de se usar somente as bandas 5, 4 e 3 TM, que são as bandas mais indicadas na discriminação da tipologia vegetal (a banda 7 foi usada apenas na fusão pela Componente Principal). É sugerido que haja pesquisas com fusões de imagens de satélites recém lançados, em face das características radiométricas e espaciais dos novos sensores (IKONOS, Landsat-7 TM, IRS e CBERS).

Deve-se considerar que tais pesquisas podem apresentar particularidades que dependem da natureza dos dados utilizados, para que seja aplicado o processamento de imagem adequado.

Uma forma de se analisar a acurácia espacial das imagens híbridas, resultantes de fusão, com a realidade de campo é utilizar levantamentos por GPS na execução dos trabalhos de campo, visto que este tipo de levantamento oferece métodos cujas as precisões são perfeitamente compatíveis com a resolução espacial das imagens de satélite. Segundo VRABEL (2000), que desenvolveu algoritmos para avaliação de resolução espacial, este é um tema carente de pesquisa, visto que envolve diversos fatores relativos ao meio e aos dados em sua realização. Pode-se ainda integrar o uso do GPS no desenvolvimento de sistemas de informação geográfica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA FILHO, R.; VITORELLO, I; BINS L. S. Application of image merging, segmentation and region- classification techniques as new approach for the detailed thematic mapping of vegetation assemblages. *Revista Brasileira de geociências*. V.27 N°2 p 270-280, junho 1997. INPE-SP. Brasil.

BARRET, C. E.; CURTIS, L. F. Introduction to environmetal remote sensing. 3ª ed. Chapman & Hall. Londres, 1992.

BARTOLUCCI, L. A.; ROBINSON, B. F.; SILVA, L. F. Field measurements of the spectral response of natural waters. *PE&RS*, V. 63, n°5, p.595-598. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing – USA, 1977.

BENSON, A; De GLÓRIA, S. D. Interpretation of Landsat-4 thematic mapper and multispectral scanner data forest surveys. *PE&RS*, V. 51. n° 9, p. 1281-1289. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1985.

BLANCHARD, L. E.; WEINSTEIN, O. Desing challenges of the thematic mapper. *IEEE v.GE-18*, n° 2, p.146-160. The Geoscience and Remote Science Society, NY-USA. 1980.

BOLSTAD, P.; LILLESAND, M. T. Rapid maximum likelihood classification. *PE&RS*, V. 57. n° 1, p. 67-69. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1991.

BOOCHS, F.; KUPFER, G.; DOCKTER K.; W. KÜHBAUCH. Shape of the red edge as vitality indicator for plants. *Int. J. Remote Sensing*. V. 11, N.º10, p. 1741-1753. Elsevier Science Publishers B. V. – Amsterdam, 1990.

BRUM, E. R. Integração dos canais multiespectrais e pancromáticos do sensor HRV (SPOT) para obtenção de composição coloridas com resolução espacial próxima a 10 metros. São José dos Campos – SP, 1989 113 f. Dissertação, INPE.

CANDEIAS, A. L. B. Uso da teoria bayesiana na fusão de dados de satélites., São José dos Campos ; 133 p. Tese. 1992. INPE

CARPER, J. W.; LILLESAND M. T; KIEFER, R. W. The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. *PE&RS*, V 56, n°4, p.459-467. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing – USA, 1990.

CHAVEZ, P. S. JR. Digital merging of Landsat TM and digitized NHAP data for 1:24000 scale image mapping. *PE&RS*, V. 52, n°10, p. 1637-1646. American Society

of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1986.

CHAVEZ, P. S. JR.; BOWELL, J. A. Comparison of the spectral information content of Landsat Thematic Mapper and SPOT for three different sites in the Phoenix, Arizona Region. PE&RS, V 54, n°12, p.1699-1708. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing – USA, 1988.

CHAVEZ, P. S. JR.; KWARTENG, A. Y. Extracting spectral contrast in landsat thematic mapper image data using selective Principal Component Analysis. PE&RS, V. 55, n° 3, p. 339-348. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1989.

CHAVEZ, P. S. JR.; SIDES, C. S.; ANDERSON, A. J. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic. PE&RS, V. 57, n°3, p.295-303. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing – USA, 1991.

CHAVEZ, P. S. JR., Comparison of spatial variability in visible and near-infrared spectral images. PE&RS, V. 58, n° 7, p. 957-964. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1992

CHERVEL, M.; COURTOIS, M.; WEILL, G. The SPOT satellite remote sensing mission. PE&RS, V. 47, n°8, p.1163-1171. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing – USA, 1981.

CIBULA, W. G.; ZETKA E. F.; RICKMAN, D. L. Response of thematic mapper bands to plant water stress. . Int. J. Remote Sensing. V. 13, n.°10, p. 1869-1880. Elsevier Science Publishers B. V. – Amsterdam, 1992.

CLICHE, G.; BONN, F.; TEILLET, P. Integration of the SPOT panchromatic channel into its multispectral mode for image sharpness enhancement. PE&RS, V 51, n°3, p.311-316. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing – USA, 1985.

COLWELL, R. N.; Vegetation canopy reflectance. Remote Sensing of Environment v. 40 n° 3, p. 175-183. Elservier. NY, USA. 1974.

COLWELL, R. N. et al. Basic matter and energy relationships involved in remote sensing reconnaissance. Photogrammetric Engineering. V. 29 n° 5; USA, 1963.

COMEC- Relatório ambiental da Região Metropolitana de Curitiba. Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba - Gov. do Est. do ParanáR,1997. 98 f.

COMEC. - Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba Mapa da região metropolitana de Curitiba. Esc.:1:200.000. Sec. Estadual de Planejamento e Coordenação geral – Governo do Estado da Paraná,1995.

CURRAN, P. J. Forum on defining Remote Sensing. PE&RS, V. 53, p. 305-306. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1987.

CONDIT, H. R. The spectral reflectance of american soil. Photogrammetric Engineering. V. 36, n° 9, p. 955-966. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1970.

CONESE, C.; MASELLI, F.; DE FILLIPIS, T. A new method for the integration of landsat TM and SPOT panchromatic data. International archives of photogrammetry and remote sensing ISPRS. Comission B3, V.29 p.892-895. 1992

CHUVIECO, E. Fundamentos de teledetección espacial. Ediciones Rialp S.A. Madrid, 1990.

DIKSHIT, O.; ROY, D. P. An empirical investigation of image resampling effects upon the espectral and textural supervised classification of high spatial resolution multispectral image. PE&RS, V. 62. n° 9, p. 1085-1092. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1996

DUGGIN, M. J; ROBBINOVE, C. J; Assumptions implicit in remote sensing data acquisition and analysis. Int. J. Remote Sensing v.11, n.10 p 1669-1694. 1990

DUTRA, L. V.; FORESTI, C.; MENESES, P. R.; KURDJIAN, M. L. N. O.; Utilização da transformação IHS para integração de imagens de diferentes resoluções: estudo de uso do solo urbano. São José do Campos, São Paulo. INPE 1988.

EMBRAPA. Boletim técnico da Divisão de pesquisa pedológica. n. 57 tomo I e II, 407 p. Governo do Estado do Paraná - Londrina, 1984.

EGBERT, D. D.; ULABY, F.T. Effect of angles on reflectivity. Photogrammetric Engineering. V. 38. n° 6, p. 556-564. American Society of Photogrammetry- USA, 1972.

EHLERS, M. Multisensor image fusion techniques in remote sensing. Int. J. Remote Sensing. N.º46, p. 19-30. Elsevier Science Publishers B. V. – Amsterdam, 1991.

FISHER, F. P; LINDENBERG, E. R. On distinctions among cartography, remote sensing, and geographic information systems. PE&RS, V. 55 n°10, p. 1431-1434. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1989.

FONSECA, L. M. G; MANJUNATH, B. S. Registration techniques for multisensor remotely sensed imagery. PE&RS, V. 62, n° 9, p. 1049-1056. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1996.

FRANK, D. T. Mapping Dominant vegetation communities in the Colorado Rocky



mountain front range with Landsat Thematic mapper and digital terrain data. PE&RS, V. 54, n° 12, p. 1727-1734. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1988.

GALVÃO, L. S.; VITTORELLO I. Role of organic matter in obliterating the effects of iron on spectral reflectance and colour of Brazilian tropical soils. Int. J. Remote Sensing. V. 19, N.º10, p. 1969-1979. Elsevier Science Publishers B. V. – Amsterdam, 1998.

GAUSMAN, H. M. Leaf reflectance of near-infrared. Photogrammetric Engineering. V. 40, n. 2, p: 83-191. 1974

GOODENOUGH, G. D. Thematic Mapper and SPOT integration with a Geographic Information System. PE&RS, V. 54. n°2,p. 167-176. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1988.

GONG, P.; HOWARTH, P. J. The use of structural information improving land-cover classification accuracies at the rural-urban fringe. PE&RS, V. 56, n° 1, p. 67-73. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1990.

GRASSO, N. D. Applications of the IHS color transformation for 1:24000-scale geologic mapping: a low cost SPOT alternative. PE&RS, V. 59. n°1, p. 73-80. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1993.

HAYDN, R et al. Applications of the IHS color transform to the processing of multisensor data and image enhancement. Proceedings: International symposium on remote sensing of arid and semi-arid lands, Cairo, Egito. 1982. In: Remote Sensing and image interpretation. 3ª ed. Wiley. USA, 1994.

HOFFER, R. M. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In: Remote Sensing: the quantitative approach. Mc GrawHill Inc. USA, 1978.

HOLBEN, B. N.; SCHUTT J. B.; McMURTREY, J. III. Leaf water stress detection utilizing thematic mapper bands 3, 4, and 5 in soybean plants. Int. J. Remote Sensing. N.º2, p. 289-297. Elsevier Science Publishers B. V. – Amsterdam, 1983.

HORLER, D. N. H.; DOCKRAY, M.; BARBER, J. The red edge of plant leaf reflectance. Int. J. Remote Sensing. V. 4, N.º2, p. 273-288. Elsevier Science Publishers B. V. – Amsterdam, 1983.

HORLER, D. N. H.; AHERN, F. J. Forestry information content of Thematic Mapper data. Int. J. Remote Sensing. V. 7, N.º3, p. 405-428. Elsevier Science Publishers B. V. – Amsterdam, 1986.

HUNTER, G. T.; BIRD, G. S. J. Critical Terrain Analysis. PE&RS . V. 36. n° 9,p. 939-952. American Society of Photogrammetry- USA, 1970.

IBGE. Carta Topográfica. Rio de Janeiro 1985. 1 mapa: cópia heliográfica. 66 X 80 cm. Escala 1:50.000. SG22-X-D-I-4.

IMHOFF, M. L.; LAWRENCE, W. T.; ELVIDGE, D. C.; PAUL, T.; LEVINE, E; PRIVALSKY, M. V.; BROWN, V.; Using Nighttime DMSP/OLS Images of the city lights to estimate the impact of urban land use on soli resources in the United States. Remote Sensing Environment. V. 59, p 105-117. New York, USA. 1997.

JAZOULI, R.; VERBYLA, D. L.; MURPHY, D. Evaluation of SPOT panchromatic digital imagery for updating road locations in a harvested forest area. PE&RS, V. 60, n° 12, p. 1449-1452. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1994.

JENSEN, J. R. Introductory Digital Image Processing a Remote Sensing Perspective. Prentice Hall. New Jersey-USA. 1996. Second edition

JENSEN, J. R; BRAIN, M. L. FRIEDMAN, S. Z., HENDERSEN, F. M. HOLZ, R. K; LINDGREN, D.; TOLL, D. L.; WELCH, R. A. WRAY, J. R. Urban /suburban land use analisis. Cap. 30, in: Manual of remote sensing. 2ªed.,V. 2, p. 1578. Sheridan Press, USA, 1983.

JENSEN, J. R.; COWEN, D. J. HALLS, J; NARUMALANI, S.; SCHMIDT, N. J.; DAVIS B. A.; BURGESS, B. Imroved urban infrastructure mapping and forecasting for bell south using remote sensing and GIS technology. PE&RS, V. 60, n° 3, p. 339-346. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1994.

JOHNSSON, K. Segment-based land-use classification from SPOT satellite data. PE&RS, V. 60, n° 1, p. 47-53. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1994.

KUMMER, M. D. Remote sensing and tropical deforestation: a cautionary note the Philipinnes. PE&RS, V. 58, n° 10, p. 1469-1471. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1992.

LANDGREBE, D. A. The quantitative approach: concept and rationale. In: Remote Sensing: The quantitative approach. McgrawHill, Inc. USA, 1978. p. 1-16

LANDGREBE, D. A Useful information from multispectral image data: another look. In: Remote Sensing: The quantitative approach. McgrawHill, Inc. USA, 1978. p. 350

LILLESAND, M. T.; KIEFER, W. R. Remote Sensing and image interpetration.3ª ed. Wiley. USA, 1994.

LO, C. P. Applied remote sensing. 1ª ed. Longman . Nova York, 1986.

LORENZI, H. Árvores Brasileiras: Manual de identificação e cultivo de Plantas arbóreas nativas do Brasil. Nova Odessa, SP. Editora Plantarum, 1992.

MAACK, R. Geografia Física do Estado do Paraná. Curitiba. Banco de Desenvolvimento do Paraná. UFPR, 1968.

MA, Z.; REDMOND, R. L. *Tau* coefficients for accuracy assessment of classification of remote sensing data. PE&RS, V. 61. nº 4, p. 435-439. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1995.

MORAN, S. M. A window-based technique for combining Landsat Thematic Mapper Thermal data with higher resolution multispectral data over agricultural lands. PE&RS, V. 56, nº 3, p. 337-342. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1990.

MUNECHIKA, C. K.; WARNICK J. S.; SALVAGGIO, C.; SCHOTT, J. R. Resolution enhancement of multispectral image data to improve classification accuracy. PE&RS, V. 65, nº 5, p. 67-72. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1993.

MUSICK, H. B.; PELLETIER R. E. Responses of some Thematic Mapper band ratios to variation in soil water content. PE&RS, V. 55, nº 3, p. 339-348. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1986.

PADILHA, R. C. B. L. A. Sensoriamento remoto em estudos intra-urbanos. Dissertação de mestrado do INPE, São José dos Campos – SP. 1995

PELLEMANS, A. H. J. M.; JORDANS, R. W. L.; ALEWIJN, R. Merging multispectral SPOT images with respect to the radiometric properties of the sensor. PE&RS, V. 59 nº1, p.81-87. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing – USA, 1993.

RASCH, H. Mapping of vegetation, land cover, and land use by satellite – Experience and conclusions for future project applications. PE&RS, V. 60. nº3, p. 265-271. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1994.

RICHARDS, J. A. Remote Sensing Digital analysis. Springer-verlag. 1ª ed Berlim-1986.

RICHARDSON, A. J.; WIEGAND, C. L. Distinguishing vegetation from soil background information. PE&RS, V. 93, nº 12, p. 1541-1552. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1977.

RIPPLE, W. J. Spectral reflectance relationships to leaf water stress. PE&RS, V. 52, n° 10, p. 1669-1675. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1986.

SALOMONSON, V. V.; WILLIAMS D. L.; BARKER J. L. Information expeditions from Landsat-D; 15th. International Symposium on Remote Sensing. Ann Arbor, Michigan USA 1981.

SABINS, F. F. Remote Sensing Principles and interpretation. 2ª ed. W. H. Freeman Co. Nova York, USA, 1987.

SCHOTT, R. J. Image processing of thermal infrared images. PE&RS, V. 55, n° 9, p. 1311-1321. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1989.

SCHOWENGERDT, R. A. Reconstruction of multispatial, multispectral image data using spatial frequency content. PE&RS, V. 46, n° 10, p. 1325-1334. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1980.

SCHOWENGERDT, R.; PARK K. S.; GRAY R. Topics in the tow-dimensional sampling and reconstruction of images. Int. J. Remote Sensing. V. 5, N.º2, p. 333-347. Elsevier Science Publishers B. V. – Amsterdam, 1984.

SCHRIEVER, J. P.; CONGLATON, R. G. Evaluating seasonal variability as an aid to cover-type mapping from Landsat Thematic Mapper data in the Northeast. PE&RS, V. 61, n°3, p. 321-327. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1995.

SHETTIGARA, V. K. A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set. PE&RS, V. 58, n°5, p. 561-567. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1992.

SHORT, N. M. N.; STUART, L. M. JR. The heat capacity mapping mission (HCMM) anthology, NASA. 1982.

SIFAKIS, N.; DESCHAMPS, P. Y. Mapping of air pollution using SPOT satellite data. PE&RS, V. 58, n° 10, p. 1433-1437. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1992.

SILVA JR., A. F.; Combinação de imagens RADARSAT e Landsat-5 TM para fins de mapeamento geo-ambiental. Curitiba, 1999. 113 f. Dissertação (Mestrado em sensoramento remoto) – Setor de ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

SILVA, L. R. F. Radiation and Instrumentation in Remote Sensing. In Remote Sensing: The quantitative approach. McGrawHill, Inc. USA, 1978.

SIMONETT, D. S. The development and principles of remote sensing. Cap. 1 in : Manual of remote sensing. 2<sup>a</sup> ed. v. 1 Sheridan Press. USA, 1983.

SINGH, A., HARRISON, A. Standardized Principal Components. Int. J. Remote Sensing. V. 6, N.º6, p. 883-896. Elsevier Science Publishers B. V. – Amsterdam, 1985.

SLATER, P. N. A reexamination of the Landsat MSS. PE&RS, V. 45, nº11, p.1479-1485. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing – USA, 1974.

SPECHT, M. R. NEEDLER, D.; FITZ, N. L. New color film for water-photography penetration. PE&RS, V. 39 nº 4, p. 359-369. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing – USA, 1973.

SUITS, G. H. Electromagnetic radiation. In chapter 2, ASP Manual of Remote Sensing – 2nd ed. 1983.

SWAIN, P. H. Fundamentals of pattern recognition in remote sensing. Chapter three in Remote Sensing: The quantitative approach. McGrawHill, Inc. USA, 1978.

TAYLOR, P. J. Quantitative methods in geography: An introduction to spatial analysis. Boston, Massachusetts; Houghton Mifflin company. 1977.

TOUTIN, T. SPOT and Landsat stereo fusion for data extraction over mountainous areas. PE&RS, V. 64 nº 2, p. 109-113. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing – USA, 1998.

TOWNSHEND, J. R. G. Agricultural land-cover discrimination using Thematic Mapper spectral bands. Int. J. Remote Sensing. V. 5, N.º4, p. 681-698. Elsevier Science Publishers B. V. – Amsterdam, 1984.

TUCKER, C. J. Spectral estimation of grass canopy variables. Remote Sensing of Environment. V. 59 nº1, p. 11-26. Elsevier. NY, USA. 1977.

TUCKER, C. J. A comparison of satellite sensor bands for vegetation monitoring. PE&RS, V. 44 nº11, p. 1369-1380. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing – USA, 1978.

TUCKER, C. J. Remote Sensing of leaf water content in the near infrared. Remote Sensing of Environment. V. 10 nº23. Elsevier. NY, USA. 1980.

TUCKER, C. J.; SELLERS P. J. Satellite remote sensing of primary production. . Int. J. Remote Sensing. V. 7, N.º11, p. 1395-1416. Elsevier Science Publishers B. V. – Amsterdam, 1986.

UNIBASE. Projeto UNIBASE - Levantamento aerofotogramétrico da região metropolitana de Curitiba. Ortofotocartas, escala 1:10.000. Curitiba, pranchas: 571, 556, 569, 570, 572, 568, 567, 566, 565, 554, 432, 430, 431, 429, 420 e 418. Ano: 1976 e 1985

VINOGRADOV, B. Remote Sensing of the acid zone vegetation in the visible spectrum for studying the productivity. Proceed 6th. International Symposium Remote Sensing Environmental p. 1237-1250, 1969.

VRABEL, J. Multispectral imagery band sharpening study. PE&RS, V. 62, nº9, p.1075-1083. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing – USA, 1996.

VRABEL, J. Multispectral imagery advanced band sharpening study. PE&RS, V. 66, nº 1, p.73-79. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing – USA, 2000.

WALD, L.; RANCHIN, T; MANGOLINI M. Fusion of images of different spatial resolutions: assessing the quality of resulting images. PE&RS, V. 63, nº6 p. 691-699. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing – USA, 1997.

WALSH, S. J. Variability of Landsat MSS spectral responses of forests in relation to stand and site characteristics. Int. J. Remote Sensing. V. 8, N.º9, p. 1289-1299. Elsevier Science Publishers B. V. – Amsterdam, 1987.

WELCH, R. Cartographic potencial of SPOT image data. PE&RS, V. 51, nº 8, p. 1085-1091. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1985.

WELCH, R; EHLERS, M. Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data. PE&RS, V. 53, nº 3, p. 301-303. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1987.

WHITE, J. D.; KROH, G. C.; PINDER III, J. E. Forest mapping at Lassen Volcanic National park, using Landsat TM data and a Geographical Information System. PE&RS, V. 61, nº 3, p. 299-305. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1995.

YOCKY, D. A. Multiresolution wavelet decomposition image merge of landsat thematic mapper and SPOT panchromatic data. PE&RS, V. 59, nº 1, p. 67-72. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - USA, 1996.

## **APÊNDICES**

## **LISTA DOS APÊNDICES**

**APÊNDICE 1 - PONTOS DE CONTROLE USADOS PARA RETIFICAÇÃO DA IMAGEM SPOT PANCROMÁTICA**

**APÊNDICE 2 - PONTOS DE CONTROLE USADOS NO REGISTRO DA IMAGEM LANDSAT-5 TM**

**APÊNDICE 3 - MATRIZES DE ERRO REFERENTES ÀS AMOSTRAS DE TREINAMENTO USADAS NA CLASSIFICAÇÃO DAS IMAGENS HÍBRIDAS DO GRUPO G1**

**APÊNDICE 4 - MATRIZES DE ERRO REFERENTES ÀS AMOSTRAS DE TREINAMENTO USADAS NA CLASSIFICAÇÃO DAS IMAGENS HÍBRIDAS DO GRUPO G2**

**APÊNDICE 5 - MATRIZES DE ERRO REFERENTES ÀS AMOSTRAS DE TREINAMENTO USADAS NA CLASSIFICAÇÃO DAS IMAGENS HÍBRIDAS DO GRUPO G3 E IMAGEM ORIGINAL**

**APÊNDICE 6 - MATRIZES DE ERRO REFERENTES À AFERIÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DAS IMAGENS HÍBRIDAS GRUPOS G1**

**APÊNDICE 7 - MATRIZES DE ERRO REFERENTES À AFERIÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DAS IMAGENS HÍBRIDAS DO GRUPO G2**

**APÊNDICE 8 - MATRIZES DE ERRO REFERENTES À AFERIÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DA IMAGEM ORIGINAL E DAS IMAGEM HÍBRIDA DO GRUPO G3**



## APÊNDICE 1 - PONTOS DE CONTROLE USADOS PARA RETIFICAÇÃO DA IMAGEM SPOT PANCROMÁTICA

Total de pontos: 21 (pares de coordenadas)

Erro médio quadrático total: 0.3835 pixel ( 3,84 m )

Ponto	Coordenadas UTM do Mapa (E, N)	Coordenadas (X,Y) da Imagem SPOT	Coordenadas previstas (X,Y)	Erro em X,Y	RMS
1	686501,26; 7186614,45	38,00; 101,00	38,09; 101,41	0,09; 0,41	0,42
2	687196,19; 7184417,61	149,56; 303,00	149,63; 302,64	0,07; -0,36	0,37
3	692840,08; 7182737,79	736,00; 354,57	736,52; 354,81	0,52; 0,24	0,58
4	696437,29; 7183913,08	1065,86; 168,14	1066,13; 168,15	0,27; 0,01	0,27
5	700370,86; 7181149,20	1507,53; 360,57	1506,94; 360,63	-0,59; 0,06	0,59
6	698858,61; 7176306,08	1454,50; 865,25	1454,74; 865,11	0,24; -0,14	0,28
7	693470,84; 7177316,44	905,70; 873,00	905,80; 873,17	0,10; 0,17	0,19
8	692036,73; 7179519,44	721,71; 686,31	721,41; 685,94	-0,30; -0,37	0,48
9	687511,64; 7181211,07	244,20; 610,13	243,91; 610,27	-0,29; 0,14	0,33
10	685406,88; 7179724,23	66,88; 797,65	66,71; 797,67	-0,17; 0,02	0,17
11	690427,34; 7175985,99	633,60; 1064,40	633,36; 1063,89	-0,24; -0,51	0,56
12	695958,00; 7173137,40	1233,13; 1233,00	1232,83; 1233,05	-0,30; 0,05	0,31
13	698873,96; 7169595,13	1589,25; 1521,75	1589,54; 1522,17	0,29; 0,42	0,51
14	691271,01; 7172540,77	783,88; 1384,88	784,36; 1384,49	0,48; -0,39	0,52
15	683737,17; 7173250,30	30,55; 1464,54	30,48; 1464,52	-0,07; -0,02	0,07
16	686098,66; 7170362,57	319,43; 1700,14	319,38; 1700,34	-0,05; 0,20	0,20
17	686090,04; 7166067,88	403,10; 2120,80	403,30; 2120,92	0,20; 0,12	0,23
18	693368,84; 7167519,24	1090,00; 1834,60	1089,85; 1834,61	-0,15; 0,01	0,15
19	694237,51; 7164084,73	1243,50; 2153,60	1243,26; 2153,74	-0,24; 0,14	0,28
20	697407,83; 7164964,42	1537,00; 2004,78	1537,42; 2004,81	0,42; 0,03	0,42
21	699926,27; 7163150,07	1821,25; 2132,88	1820,99; 2132,67	-0,26; -0,21	0,34

## APÊNDICE 2 - PONTOS DE CONTROLE USADOS NO REGISTRO DA IMAGEM LANDSAT-5 TM

Total de pontos: 18

Erro médio quadrático total: 0.3501 pixel (10,50 m).

Ponto	Coordenadas na imagem SPOT (X,Y)	Coordenadas na imagem Landsat-5 TM (X, Y)	Coordenadas Previstas (X,Y)	Erro (X,Y)	RMS
1	541,88; 142,25	1753,13; 1161,25	1753,46; 1160,90	0,33; -0,35	0,49
2	1076,93; 495,00	1952,95; 1242,45	1953,10; 1242,50	0,15; 0,05	0,15
3	1642,91; 324,64	2121,67; 1155,42	2121,71; 1155,33	0,04; -0,09	0,10
4	2028,00; 665,06	2272,47; 1241,47	2272,29; 1241,70	-0,18; 0,23	0,29
5	1519,33; 1039,67	2138,27; 1390,64	2138,11; 1390,74	-0,16; 0,10	0,19
6	335,50; 795,20	1738,50; 1381,00	1738,14; 1381,26	-0,36; 0,26	0,44
7	836,00; 1168,93	1928,64; 1471,82	1928,39; 1471,56	-0,25; -0,26	0,36
8	293,00; 1645,13	1791,13; 1655,13	1790,86; 1654,98	-0,27; -0,15	0,30
9	1231,00; 1474,13	2079,73; 1545,82	2079,42; 1546,12	-0,31; 0,30	0,43
10	1715,07; 1435,00	2231,67; 1505,89	2232,15; 1505,61	0,48; -0,28	0,55
11	1252,73; 769,55	2031,00; 1320,00	2031,16; 1319,95	0,16; -0,05	0,16
12	313,00; 1182,00	1760,88; 1505,63	1761,12; 1506,01	0,24; 0,38	0,45
13	146,13; 2035,13	1774,00; 1788,00	1774,03; 1787,95	0,03; -0,05	0,06
14	785,14; 1915,14	1969,93; 1712,64	1970,43; 1712,69	0,50; 0,05	0,50
15	1114,14; 2182,57	2097,11; 1779,22	2097,33; 1779,02	0,22; -0,20	0,30
16	1341,89; 1835,11	2143,75; 1655,25	2143,43; 1654,93	-0,32; -0,32	0,45
17	1631,09; 2316,00	2274,43; 1791,43	2274,31; 1791,71	-0,12; 0,28	0,31
18	597,80; 491,60	1798,93; 1269,07	1798,76; 1269,16	-0,17; 0,09	0,19

**APÊNDICE 3 - MATRIZES DE ERRO REFERENTES ÀS AMOSTRAS DE TREINAMENTO  
USADAS NA CLASSIFICAÇÃO DAS IMAGENS HÍBRIDAS DO GRUPO G1**

**IMAGEM HÍBRIDA RESULTANTE DA FUSÃO POR COR NORMALIZADA (CNG1)**

Classe	AgF	AgR	MaR	Ref	RefS	SoEx	Urb	Cap	FC	FOM	SMaR	SFOM	Total
AgF	226	70											296
AgR	29	131											160
MaR			112		2			21	34	2	24	1	196
Ref				98	25					8		2	133
RefS		5	1	11	15				15	4	2	2	55
SoEx		2			2	113	51						168
Urb						16	253						269
Cap			1	1	1		3	226	23	11			266
FC		1	9		2			23	152	16			203
FOM			4	4	2			11	36	102	5	6	170
SmaR			10		5				8	4	124	13	164
SFOM				7	32				14	26	21	61	161
Total	255	209	137	121	86	129	307	281	282	173	176	85	2241

**IMAGEM HÍBRIDA RESULTANTE DA FUSÃO POR TRANSFORMAÇÃO IHS (IHSG1)**

Classe	AgF	AgR	MaR	Ref	RefS	SoEx	Urb	Cap	FC	FOM	SMaR	SFOM	Total
AgF	182	57											239
AgR	25	147			3	1							176
MaR			158		3			34	7	2	11	2	217
Ref				86	14					20		2	122
RefS			1	47	41				6	6	2	4	107
SoEx						79	50	1					130
Urb						71	251	5					327
Cap		3	2	10	2		6	212	11	5			251
FC			6	1	2			23	93	4			129
FOM			4	11	1			6	8	63			93
SmaR	48		19		11				9		112	16	215
SFOM		2	2	8	47				8	25	13	61	166
Total	255	209	192	163	124	151	307	281	142	125	138	85	2172

**IMAGEM HÍBRIDA RESULTANTE DA FUSÃO POR COMPONENTES PRINCIPAIS (CPG1)**

Classe	AgF	AgR	MaR	Ref	RefS	SoEx	Urb	Cap	FC	FOM	SMaR	SFOM	Total
AgF	236	4											240
AgR	19	162					11						192
MaR			127					23					150
Ref				73	5					9			87
RefS		5		4	59		1		2	3		12	86
SoEx						145	45						190
Urb		31				15	131						177
Cap			3				1	233	3	21			261
FC		1						16	81				98
FOM			4					9		128			141
SmaR			3		3						79	27	112
SFOM		6			16				2	16	10	46	96
Total	255	209	137	77	83	160	189	281	88	177	89	85	1830

**LEGENDA:**

AgF – Corpos d’água profundos  
 AgR – Corpos d’água rasos  
 MaR – Mata Remanescente  
 Ref – Reflorestamento  
 Ref – Reflorestamento (sob sombra)  
 SoEx – Solo Exposto

Urb – Área Urbana  
 Cap – Capões e regiões de várzea  
 FC – Floresta Ciliar  
 FOM – Floresta Ombrófila Mista  
 SmaR - Mata Remanescente (sob sombra)  
 SFOM - Floresta Ombrófila Mista (sob sombra)

## APÊNDICE 4 - MATRIZES DE ERRO REFERENTES ÀS AMOSTRAS DE TREINAMENTO USADAS NA CLASSIFICAÇÃO DAS IMAGENS HÍBRIDAS DO GRUPO G2

### IMAGEM GERADA POR COR NORMALIZADA (CNG2)

Classe	AgF	AgR	MaRem	Reflr	ReflrS	Solexp	Urb	Cap	FloCil	FIOM	SMaR	SFloM	Total
AgF	240	75											315
AgR	15	89											104
MaRem			202	1	11					42	23	4	283
Reflr		1	1	40	20				1	10	2	12	87
ReflrS				18	63				4	22	10	16	133
Solexp		1				134	23	1					159
Urb				2		61	245	2					310
Cap			1		1		6	217	10	21			256
FloCil			5					14	102	44			165
FIOM			9	15	2				11	90	2	10	139
SMaR			20		18					15	129	18	200
SFloM			1	4	9					25	10	25	74
Total	255	166	239	80	124	195	274	234	128	269	176	85	2225

### IMAGEM GERADA PELA FUSÃO POR TRANSFORMAÇÃO IHS (IHS2)

Classe	AgF	AgR	MaRem	Reflr	ReflrS	Solexp	Urb	Cap	FloCil	FIOM	SMaR	SFloM	Total
AgF	178	73											251
AgR	29	92											121
MaRem			161	3	10			24		8	16	7	229
Reflr				57	20					4	1	9	91
ReflrS				14	47				4		2	7	74
Solexp						106	43						149
Urb						89	224	3					316
Cap			3	2	2	2	7	215	8	1			240
FloCil			1					27	101	9			138
FIOM			25	21	1			12	15	85		4	163
SMaR	48		49	2	22					3	146	26	296
SFloM		1		22	22					13	11	32	101
Total	255	166	239	121	124	197	274	281	128	123	176	85	2169

### IMAGEM GERADA PELA FUSÃO POR COMPONENTE PRINCIPAL (CPG2)

Classe	AgF	AgR	MaRem	Reflr	ReflrS	Solexp	Urb	Cap	FloCil	FIOM	SMaR	SFloM	Total
AgF	250	2											252
AgR	3	161				30							194
MaRem			143		2			16			16		177
Reflr				80	34				2	26	3	22	167
ReflrS				11	60	2			4	1	8	13	99
Solexp		3			1	176	56	2					238
Urb						25	212						237
Cap			5			4	6	239	10	13			277
FloCil				2				19	107	20			148
FIOM			16	15	1			5	5	87	9	5	143
SMaR			20		12					15	125	18	190
SFloM	2			13	14					13	15	27	84
Total	255	166	184	121	124	237	274	281	128	175	176	85	2206

#### LEGENDA:

AgF – Corpos d'água profundos

AgR – Corpos d'água rasos

MaR – Mata Remanescente

Ref – Reflorestamento

Ref – Reflorestamento (sob sombra)

SoEx – Solo Exposto

Urb – Área Urbana

Cap – Capões e regiões de várzea

FC – Floresta Ciliar

FOM – Floresta Ombrófila Mista

SmaR - Mata Remanescente (sob sombra)

SFOM - Floresta Ombrófila Mista (sob sombra)

## APÊNDICE 5 - MATRIZES DE ERRO REFERENTES ÀS AMOSTRAS DE TREINAMENTO USADAS NA CLASSIFICAÇÃO DAS IMAGENS HÍBRIDAS DO GRUPO G3 E IMAGEM ORIGINAL

### IMAGEM HÍBRIDA RESULTANTE DA FUSÃO POR COMPONENTES PRINCIPAIS (CPG3)

Classe	AgF	AgR	MaR	Ref	RefS	SoEx	Urb	Cap	FC	FOM	SMaR	SFOM	Total
AgF	251												251
AgR	3	191				18	4						216
MaR			174					32	1	9	10		226
Ref				109	9					14		1	133
RefS		5		1	83	1			10	3	9	11	123
SoEx	1					186	63						250
Urb						31	239						270
Cap			2			1	1	230	12	14			260
FC		1	2		2			14	148	1	5	4	177
FOM			6	8				5	1	120			140
SmaR			7		16				8	4	130	20	185
SFOM		12	1	3	14				2	12	22	49	115
Total	255	209	192	121	124	237	307	281	182	177	176	85	2346

### IMAGEM ORIGINAL (BANDAS 5 4 3 TM)

Classe	AgF	AgR	MaR	Ref	RefS	SoEx	Urb	Cap	FC	FOM	SMaR	SFOM	Total
AgF	247												247
AgR	8	205			1								214
MaR			127					31	3	7			168
Ref				109	3					6			118
RefS				1	68					8	4	1	82
SoEx						124	23						147
Urb		4				36	199						239
Cap			2	5	1		1	212	2	13			236
FC			1		3			34	116	1	8		163
FOM			2	1	1			4		170	2	2	182
SmaR			5		7				7	5	87	6	117
SFOM				5	40					13	26	76	160
Total	255	209	137	121	124	160	223	281	128	223	127	85	2073

#### LEGENDA:

AgF – Corpos d'água profundos  
 AgR – Corpos d'água rasos  
 MaR – Mata Remanescente  
 Ref – Reflorestamento  
 Ref – Reflorestamento (sob sombra)  
 SoEx – Solo Exposto

Urb – Área Urbana  
 Cap – Capões e regiões de várzea  
 FC – Floresta Ciliar  
 FOM – Floresta Ombrófila Mista  
 SmaR - Mata Remanescente (sob sombra)  
 SFOM - Floresta Ombrófila Mista (sob sombra)

## APÊNDICE 6 - MATRIZES DE ERRO REFERENTES À AFERIÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DAS IMAGENS HÍBRIDAS GRUPOS G1

### IMAGEM HÍBRIDA OBTIDA POR COR NORMALIZADA (CNG1)

Classe	Ag	FOM	Ref	Sol	Urb	Var	FLC	Total
Ag	456							456
FOM		454	7			30	76	567
Ref		45	113					158
Sol	2			113	51			166
Urb	3			16	253			272
Var		19	1		3	228	25	276
FLC	3	53				23	181	260
Total	464	571	121	129	307	281	282	2155

AG-Água, FOM-Floresta Ombrófila Mista; REF-Reflorestamento; SOL-Solo Exposto; URB-Área Urbana; VAR-Várzeas e capões; FLC-Floresta ciliar.

### IMAGEM HÍBRIDA RESULTANTE DA FUSÃO POR TRANSFORMAÇÃO IHS (IHSG1)

Classe	Ag	FOM	Ref	Sol	Urb	Var	FLC	Total
Ag	126			2				128
FOM	34	289	5				6	334
Ref		1	75				5	81
Sol				101	35	1		137
Urb				132	205	13		350
Var				20		238	30	288
FLC		30		1		4	215	250
Total	160	320	80	256	240	256	256	1568

AG-Água, FOM-Floresta Ombrófila Mista; REF-Reflorestamento; SOL-Solo Exposto; URB-Área Urbana; VAR-Várzeas e capões; FLC-Floresta ciliar.

### IMAGEM HÍBRIDA RESULTANTE DA FUSÃO POR COMPONENTES PRINCIPAIS (CPG1)

Classe	Ag	FOM	Ref	Sol	Urb	Var	FLC	Total
Ag	160			1				161
FOM		310	9			13	7	339
Ref		2	71				6	79
Sol				144	62	4	1	211
Urb				101	178	34		313
Var		1		7		158	13	179
FLC		7		3		47	229	286
Total	160	320	80	256	240	256	256	1568

AG-Água, FOM-Floresta Ombrófila Mista; REF-Reflorestamento; SOL-Solo Exposto; URB-Área Urbana; VAR-Várzeas e capões; FLC-Floresta ciliar.

## APÊNDICE 7 - MATRIZES DE ERRO REFERENTES À AFERIÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DAS IMAGENS HÍBRIDAS DO GRUPO G2

### IMAGEM HÍBRIDA OBTIDA POR COR NORMALIZADA (CNG2)

Classe	Ág	FOM	Ref	Sol	Urb	Var	FLC	Total
Ág	146							146
FOM	1	266	13				33	313
Ref	13	21	67				17	118
Sol				184	72	23		279
Urb				53	168	1		222
Var				11		225	17	253
FLC		33		8		7	189	237
Total	160	320	80	256	240	256	256	1568

AG-Água, FOM-Floresta Ombrófila Mista; REF-Reflorestamento; SOL-Solo Exposto; URB-Área Urbana; VAR-Várzeas e capões; FLC-Floresta ciliar.

### IMAGEM HÍBRIDA RESULTANTE DA FUSÃO POR TRANSFORMAÇÃO IHS (IHSG2)

Classe	Ág	FOM	Ref	Sol	Urb	Var	FLC	Total
Ág	116							116
FOM	41	290	21				21	373
Ref	3	11	59				13	86
Sol				102	29	17		148
Urb				125	211	7		343
Var				21		227	19	267
FLC		19		8		5	203	235
Total	160	320	80	256	240	256	256	1568

AG-Água, FOM-Floresta Ombrófila Mista; REF-Reflorestamento; SOL-Solo Exposto; URB-Área Urbana; VAR-Várzeas e capões; FLC-Floresta ciliar.

### IMAGEM HÍBRIDA RESULTANTE DA FUSÃO POR COMPONENTES PRINCIPAIS (CPG2)

Classe	Ág	FOM	Ref	Sol	Urb	Var	FLC	Total
Ág	134							134
FOM	24	272	7				9	312
Ref	1	27	72				23	123
Sol	1			203	110	31		345
Urb				15	130	1		146
Var		5		38		213	23	279
FLC		16	1			11	201	229
Total	160	320	80	256	240	256	256	1568

AG-Água, FOM-Floresta Ombrófila Mista; REF-Reflorestamento; SOL-Solo Exposto; URB-Área Urbana; VAR-Várzeas e capões; FLC-Floresta ciliar.

**APÊNDICE 8 - MATRIZES DE ERRO REFERENTES À AFERIÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO  
DA IMAGEM ORIGINAL E DAS IMAGEM HÍBRIDA DO GRUPO G3**

**IMAGEM ORIGINAL**

Classe	Ag	FOM	Ref	Sol	Urb	Var	FIC	Total
Ag	160							160
FOM		255	7				38	300
Ref			73				1	74
Sol				59	142			201
Urb				177	98	19		294
Var		36		20		230	3	289
FIC		29				7	214	250
Total	160	320	80	256	240	256	256	1568

AG-Água, FOM-Floresta Ombrófila Mista; REF-Reflorestamento; SOL-Solo Exposto; URB-Área Urbana; VAR-Várzeas e capões; FLC-Floresta ciliar.

**IMAGEM HÍBRIDA RESULTANTE DA FUSÃO POR COMPONENTES PRINCIPAIS (CPG3)**

Classe	Ag	FOM	Ref	Sol	Urb	Var	FIC	Total
Ag	421			7	1			429
FOM	9	511				20	13	553
Ref		35	121					156
Sol	32			198	65			295
Urb				31	240			271
Var		56		1	1	247	12	317
FIC	2	28				14	157	201
Total	464	630	121	237	307	281	182	2222

AG-Água, FOM-Floresta Ombrófila Mista; REF-Reflorestamento; SOL-Solo Exposto; URB-Área Urbana; VAR-Várzeas e capões; FLC-Floresta ciliar.